

1 研究の概要

1.1 目的と位置づけ

地震火災は、伝統的に木造建物を嗜好し、かつ、人口密度が高いという特徴を持つわが国の市街地の宿命とも言える被害様相である。市街地の難燃化と公設消防の整備が昭和30年代より着々と進められた結果、日常火災の都市大火の恐れは急減し、地震火災の危険性も改善したものとの社会的な認識が漠然と広がっていた。しかし、1995年の阪神・淡路大震災では、大規模な地震火災が発生し、神戸市のインナーシティを中心に約65ha(0.65km²)もの市街地が焼失した。この延焼被害は、テレビ局による生中継と相まって、日本の市街地が地震火災に対して依然として脆弱であることを社会全体に認識させた。しかし冷静に考えれば、更新が進んでいない市街地、つまり昔のままの町であれば、以前と同じレベルの地震火災の危険性が潜在しており、出火件数が消防ポンプ車を上回る状況では、その危険性が顕在化することは当然のことである。

阪神・淡路大震災以降、木造密集市街地の解消に向けて各方面で努力がなされているが、その歩みは遅々としている。平成15年の国土交通省の発表¹⁾によれば、「地震時等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」は、約8,000ha(80km²)存在するといわれており、このうち、東京都、大阪府に、それぞれ約2,300ha(23km²)存在するとされている(表1-1)。こうした地域では、相当の地震火災による延焼被害が危惧されている。また、東京都の地震被害想定²⁾によると、東京都区部を震源とする直下型地震の場合、約100km²もの延焼被害が想定されている。これは阪神・淡路大震災の約100倍のオーダーである。

また、昨今、東海地震、東南海・南海地震をはじめとする広域に被害をもたらす巨大地震の発生が危惧されているところである。こうした地震に対して被害の危険性を事前把握するためには、広域にわたって統一的に適用できる評価方法が社会的に要請されているところでもある。

一方、社会の安全化を考えると、地震被害の危険性の評価は、防災関係者だけのものではない。一般市民・企業の努力の積み重ねがあってこそ、社会の安全化が実現されるのである。一般市民・企業が正しくリスクを認識し、安全化にむけて自然に踏み出せる環境づくりが必要とされている。専門家と市民との間のリスクコミュニケーションの円滑化がその第一歩である。そのための手段として、使いやすく分かりやすいリスクを認識させる道具が必要とされている。

表 1-1 地震時等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¹⁾
(国土交通省発表)

都道府県別		市区町村別			都道府県別		市区町村別				
都道府県名	重点密集市街地 (面積)	市区町村名	重点密集市街地 (地区数、面積)		都道府県名	重点密集市街地 (面積)	市区町村名	重点密集市街地 (地区数、面積)			
北海道	1ha	函館市	1地区	1ha	大阪府	2,295ha	大阪市	22地区	1,360ha		
青森県	51ha	青森市	7地区	23ha			堺市	1地区	17ha		
		弘前市	2地区	6ha			豊中市	2地区	255ha		
		八戸市	5地区	22ha			守口市	2地区	206ha		
岩手県	-						寝屋川市	3地区	248ha		
宮城県	39ha	仙台市	5地区	36ha			門真市	1地区	134ha		
		石巻市	1地区	2ha			摂津市	1地区	26ha		
		気仙沼市	1地区	1ha			東大阪市	1地区	49ha		
秋田県	-						兵庫県	295ha	神戸市	6地区	204ha
山形県	-			尼崎市					4地区	85ha	
福島県	-				明石市	1地区	6ha				
茨城県	-				奈良県	77ha	奈良市	4地区	26ha		
栃木県	-						大和高田市	1地区	1ha		
群馬県	-						大和郡山市	2地区	10ha		
埼玉県	120ha	さいたま市	1地区	2ha			天理市	1地区	4ha		
		川口市	2地区	54ha			橿原市	2地区	5ha		
		秩父市	1地区	6ha			五条市	1地区	1ha		
		本庄市	3地区	19ha			香芝市	1地区	13ha		
		戸田市	1地区	5ha			上牧市	1地区	1ha		
		鳩ヶ谷市	3地区	34ha	王寺市	2地区	15ha				
千葉県	474ha	千葉市	6地区	51ha	和歌山県	61ha	和歌山市	3地区	6ha		
		市川市	22地区	189ha			海南市	2地区	25ha		
		船橋市	14地区	77ha			橋本市	1地区	7ha		
		松戸市	5地区	148ha			田辺市	1地区	2ha		
		浦安市	1地区	9ha			新宮市	5地区	7ha		
							かつらぎ町	1地区	8ha		
東京都	2,339ha	文京区	2地区	54ha			高野口町	3地区	3ha		
		台東区	1地区	19ha			印南町	1地区	3ha		
		墨田区	1地区	179ha			鳥取県	5ha	岩美町	2地区	5ha
		品川区	1地区	252ha			島根県	-			
		目黒区	3地区	175ha	岡山県	36ha	岡山市	4地区	30ha		
		大田区	2地区	164ha			倉敷市	1地区	2ha		
		世田谷区	3地区	230ha			笠岡市	1地区	4ha		
		渋谷区	1地区	57ha	広島県	127ha	広島市	8地区	73ha		
		中野区	2地区	152ha			呉市	1地区	7ha		
		杉並区	1地区	155ha			尾道市	1地区	6ha		
		豊島区	4地区	152ha			府中町	1地区	41ha		
		北区	3地区	188ha	山口県	11ha	下関市	1地区	11ha		
		荒川区	2地区	154ha	徳島県	18ha	徳島市	1地区	3ha		
		板橋区	3地区	132ha			鳴門市	2地区	3ha		
		練馬区	2地区	87ha			由岐町	3地区	10ha		
		足立区	3地区	125ha			牟岐町	2地区	2ha		
		葛飾区	1地区	22ha	香川県	3ha	丸亀市	1地区	3ha		
江戸川区	2地区	42ha	愛媛県	3ha	宇和島市	1地区	3ha				
神奈川県	749ha	横浜市	23地区	660ha	高知県	58ha	高知市	6地区	58ha		
		川崎市	5地区	39ha			福岡県	194ha	北九州市	3地区	52ha
		横須賀市	2地区	32ha	福岡市	8地区			84ha		
		秦野市	1地区	19ha	飯塚市	1地区			1ha		
新潟県	-			田川市	2地区	17ha					
富山県	4ha	新湊市	1地区	4ha	山田市	1地区			4ha		
石川県	35ha	金沢市	3地区	35ha	鞍手町	2地区			5ha		
福井県	-				稲築町	3地区			19ha		
山梨県	-				穂波町	2地区			2ha		
長野県	10ha	長野市	5地区	10ha	額田町	1地区	5ha				
岐阜県	4ha	岐阜市	1地区	4ha	香春町	2地区	5ha				
静岡県	2ha	東伊豆町	1地区	2ha	方城町	1地区	2ha				
愛知県	142ha	名古屋市	4地区	123ha	佐賀県	23ha	唐津市	5地区	14ha		
		岡崎市	1地区	4ha			厳木町	1地区	6ha		
		安城市	1地区	16ha	呼子町	1地区	2ha				
三重県	19ha	桑名市	1地区	8ha	長崎県	297ha	長崎市	5地区	297ha		
		尾鷲市	1地区	2ha	熊本県	46ha	熊本市	4地区	46ha		
		熊野市	1地区	2ha	大分県	27ha	大分市	2地区	26ha		
		南島市	1地区	3ha			別府市	1地区	1ha		
		紀伊長島町	2地区	5ha	宮崎県	8ha	日向市	1地区	8ha		
滋賀県	10ha	大津市	2地区	10ha	鹿児島県	17ha	鹿児島市	1地区	7ha		
京都府	373ha	京都市	59地区	364ha			名瀬市	4地区	11ha		
		城陽市	1地区	2ha	沖縄県	-					
		向日市	3地区	7ha	合計	7,971ha					

(注) 既往の統計資料等を用いた推計値であり、概数である。

(小数点1桁で四捨五入しているため合計値が一致しない場合がある。)

こうした背景をふまえ、本研究では日本全国を対象に、統一的に適用しうる地震火災の危険性を評価する方法を構築することを目的としている。具体的には、

- ・ 全国の市区町村を対象とし、
 - ・ ある単位での出火件数、或いは、出火確率が与えられたとき、
 - ・ 短時間で、既存手法と比べ精度よく、
 - ・ 焼失棟数を計算する「しくみ」を構築すること
- である。

計算方法の構築にあたっては、数多くの地震に対して計算が行えるように短時間での処理を目指した。

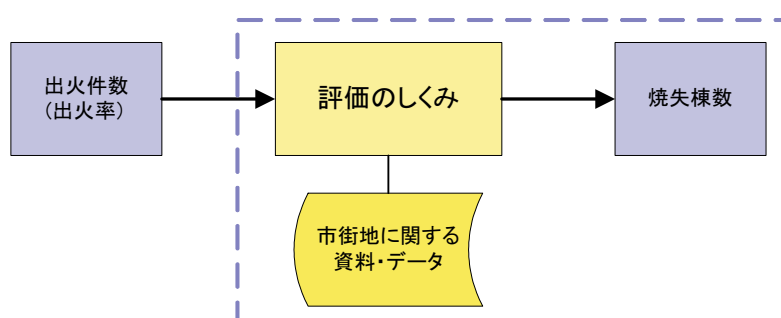


図 1-1 本研究の目的

1.2 既往の評価手法の整理

1.2.1 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^{3), 4)} (以下、市街地指標による評価方法)、シミュレーションによる評価方法に大別される。さらにシミュレーションによる評価方法は、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^註、戸別建物データを利用する方法⁷⁾に大別される。

- ① 市街地指標による評価方法 (図 1-2)
- ② シミュレーションによる評価方法 (図 1-3)
 - ・ メッシュデータ利用
 - ・ 戸別建物データ利用

市街地指標による評価方法は、モデル的な分析により求められた、市街地指標と市街地の焼失確率を結びつける関数形によって、市街地指標の数値から延焼危険を評価するものである。ここでいう市街地指標は、統計資料から得られる数値で、例えば、不燃領域率、木造・防火造建蔽率等があり、町丁目やメッシュ等を集計単位としている。例えば、「不

註 例えば、文献 5), 6)等多数。

燃領域率」による方法では、図 1-4 左図に示されたモデル市街地をもとに、図 1-4 右図に示す、不燃領域率という市街地指標を説明変数、市街地の焼失確率を被説明変数とする関数形が与えられており、このグラフと不燃領域率の数値より延焼危険を評価している。なお、「不燃領域率」とは、耐火建物等、燃えないとされる建物の建築面積、ある一定規模以上の空地・道路をさす。

一方、シミュレーションによる評価方法は、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。この場合、結果は、何時間後の焼失範囲というように与えられる。

①は、市街地指標の数値から延焼危険のレベルが判定されるのに対して、②は、時系列で消失範囲が与えられるのが大きな違いである。①の方法は静的な評価方法、②の方法は動的な評価方法と言える。

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。

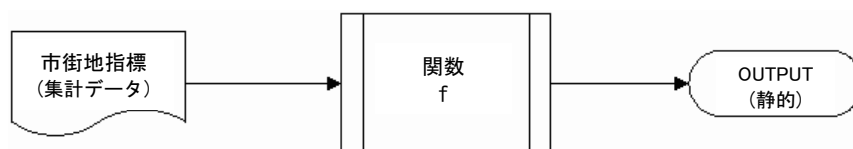


図 1-2 市街地指標による評価フロー

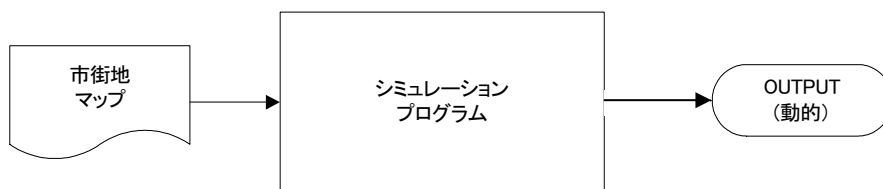


図 1-3 シミュレーションによる評価フロー

1.2.2 市街地指標による評価方法の問題点

市街地指標による評価方法としては、「不燃領域率」による方法、「木防建蔽率（木造・防火造のグロス建蔽率^注）」による方法が代表的である。これらの方法は、いずれも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、統計情報より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。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 1-4 中の左図）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確率との関係を求めたもの（図 1-4 中の右図）を基礎としている。

^注 定義は次のとおり。（木造建築面積+防火造建築面積）/市街地面積。

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 1-4 中の右図に示された関係より、極めて簡便に焼失確率を求めることができる。この方法は、簡便さという点で非常に優れているが、評価精度は劣ると言える。この方法では、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、図 1-5 は不燃領域率がほぼ等しい2つの市街地を示しているが、両図にみるように、市街地指標が同じ場合でも実市街地の市街地特性が異なることは多い。図 1-5(a)は、木造建物の比率の高い低密度の市街地である。一方、図 1-5(b)は、典型的な密集市街地である。建物密度は高いが、木造三階建と思われる準耐火建物が多く、図 1-5(a)と比べ木造建物の比率は低く、また地区内に小中学校、広幅員道路があり、不燃領域率はそれほど低くはない。明らかに両者の市街地特性は異なっており、延焼危険も異なることが推察されるが、不燃領域率をみると両者はほぼ一致している。このように市街地指標を用いる方法は、計算コストをかけずに延焼危険を大局的に捉える方法としては有用であるが、市街地の空間特性が詳細に反映されないため、評価精度に限界が見られる。

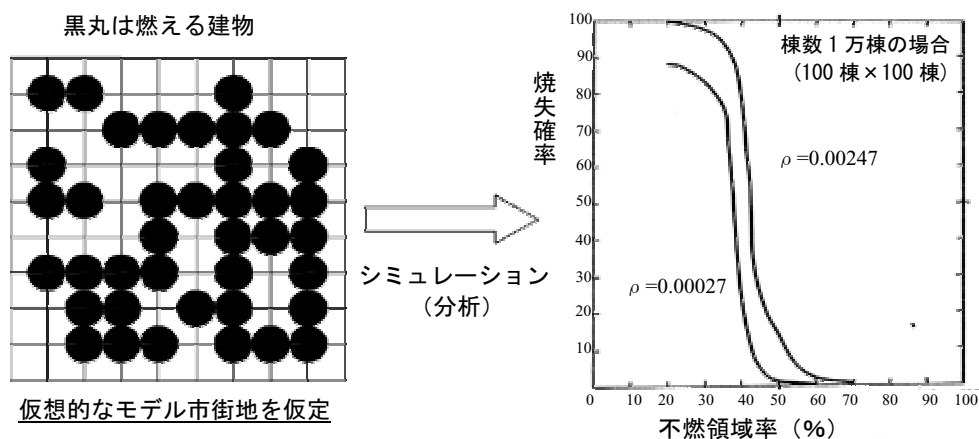


図 1-4 市街地指標による評価方法の構築方法

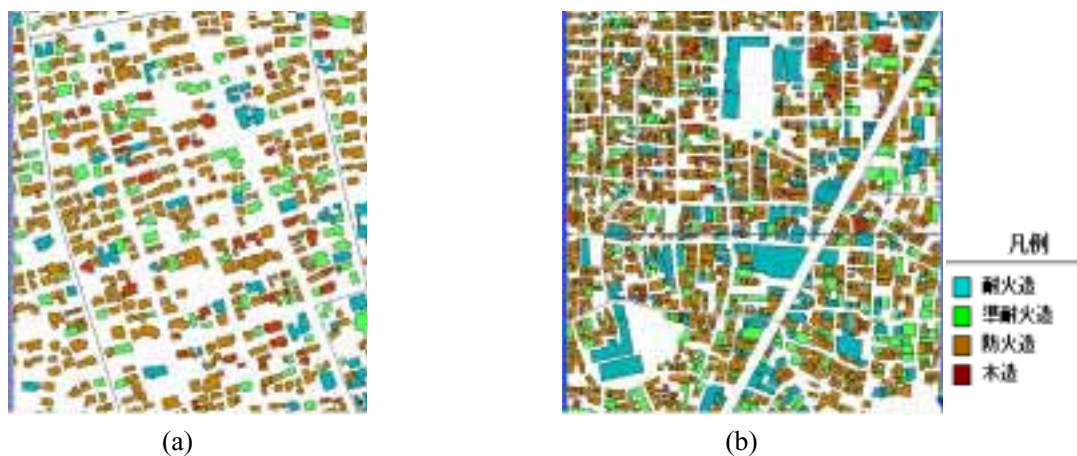


図 1-5 市街地指標による評価方法の問題点：両図は不燃領域率がほぼ等しい。ある市街地指標が同じでも延焼危険が異なる場合はある。

1.2.3 シミュレーションによる評価方法の問題点

一方、シミュレーションによる評価方法としては、古典的には、メッシュデータを用いた方法、戸別建物データを用いた方法がある。

前者については、500mメッシュ、250mメッシュで行われるのが一般的である。この方法は、草創期において用いられた方法である。しかし、メッシュデータの性質に起因する次のような問題を指摘することができる。メッシュデータはメッシュ内の集計値であるため、メッシュ内は「平均化」された均一な市街地として捉えられている。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、延焼性状を正確に表現し得ないという問題も指摘しうる。例えば、図 1-6 ((a)-1) は、メッシュ内に広幅員の幹線道路がある市街地の例である。メッシュ内左側の密集市街地から出火した場合、延焼は南北の幹線道路で遮断されることが予想される(図 1-6 (b)-1)。しかしメッシュデータでは、幹線道路の存在はメッシュデータの中に埋没してしまい(図 1-6 (a)-2)、ある一定の延焼速度で拡大すると予測される。そのため、幹線道路の有無に関わらず、延々と延焼が拡大していくことになるのである(図 1-6 (b)-2)。

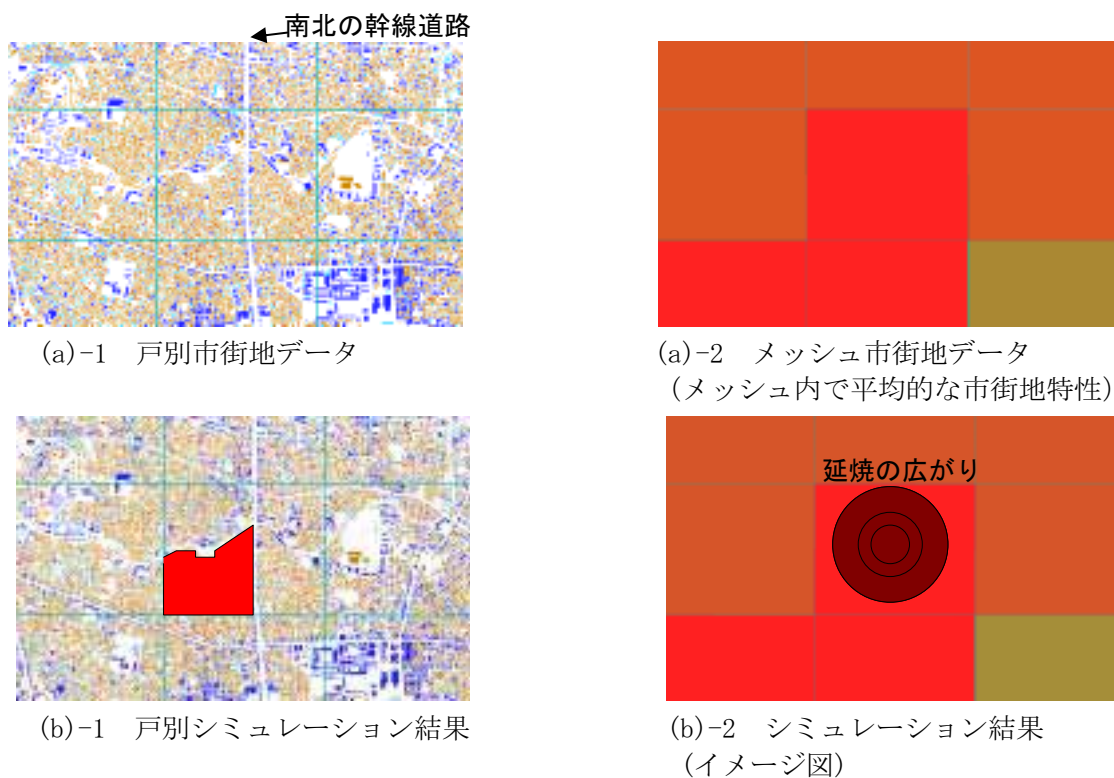


図 1-6 メッシュデータによるシミュレーション手法の問題点：図郭中央の南北の幹線道路は十分な幅員があるため、道路左側からの延焼火災はこの道路で遮断される。しかしメッシュデータを用いた方法では、メッシュ内では平均的・均一な市街地特性となり、幹線道路が表現されない。そのため、幹線道路を越えて延焼が拡大するという結果となる。

また、シミュレーションに際しては、出火点がどこかのメッシュに設定される。出火点が設定されたメッシュについては延焼被害が予測されるが、設定されないメッシュについては評価の対象外となる。つまり、出火点が設定されないメッシュの延焼危険は、評価結果に現れない。出火の可能性の程度の差こそあれ、出火確率がゼロでない限り、どこでも出火する可能性がある。この方法では、出火点が設定されないメッシュの延焼危険は潜在化してしまうのである。

一方、戸別建物データを用いた方法は、地図データの整備とコンピューターの性能向上に伴って、一般化してきた。「燃え草」の最小単位である建物をそのままデータ化しているので、精度の高いシミュレーションを行うことができる。この方法では、市街地の空間特性が評価に反映しないというメッシュデータで指摘されるような問題点は生じない。しかし、一方で、データの精度が高い故の問題を指摘することができる。第一に、コンピューターの性能が向上したとは言え、広い範囲の市街地を対象とした場合、計算時間が必要になることである。例えば、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^注の計算が必要である。第二は、評価結果が出火点の位置に依存することである。戸別建物データでは、空間の特性がそれぞれの場所特有のものなので、出火点の位置によって評価結果は変わり得る。例えば、近傍にオープンスペース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、延焼性状は大きく異なる。図 1-7 はその一例を示したものである。風速、風向条件は同じ設定であるが、出火点が異なる場合のシミュレーション結果を示している。(a)、(b)は、3 時間後、6 時間後の結果であるが、延焼範囲が大きく異なることが分かる。図 1-7 の左側の図 ((a)-1, (b)-1) では、ほぼ全域が延焼するのに対して、右側の図 ((a)-2, (b)-2) では、出火建物の北側直近に道路があるため、出火当初は北側に延焼しない。最終的に出火建物の北側街区は延焼領域が東側から回りこんで焼失してしまうが、6 時間後の焼失範囲は左図の場合とは大きく異なる。

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。出火点を1箇所と仮定すれば、建物棟数分の回数のシミュレーションを行うことになる。図 1-8 は、その例である。しかしこうした計算を行う場合、多大な計算時間を要するため、広い範囲を対象とした場合、現実的な時間内で計算することは不可能である。

^注文献 8)のシステムを用いた場合

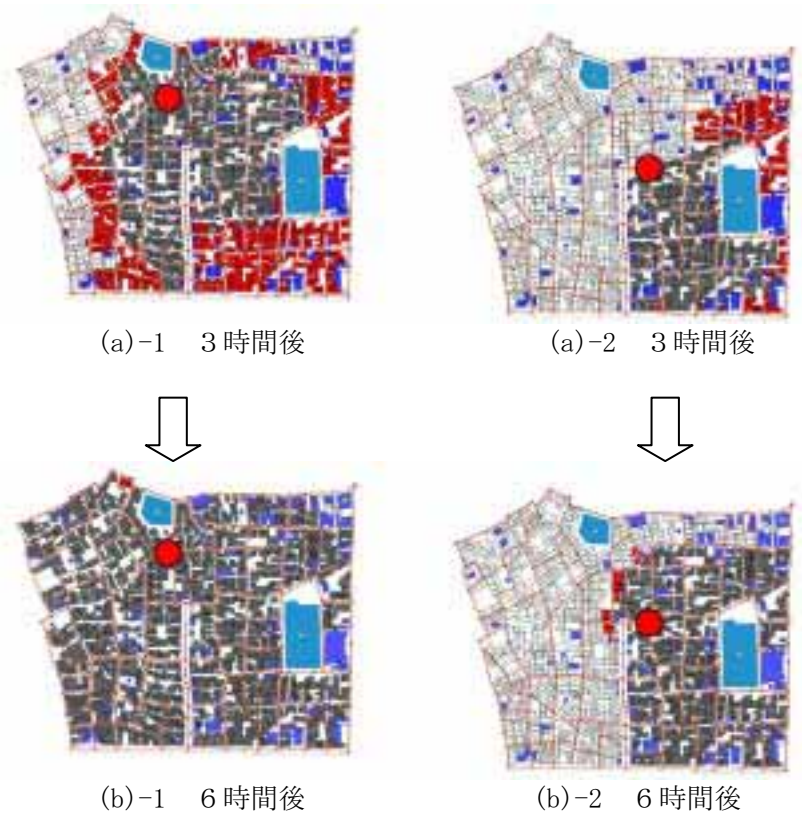


図 1-7 戸別建物データによるシミュレーション手法の問題点（1）：出火点の違いにより結果が異なる．図中，赤丸は出火点．青色建物は不燃建物，赤色建物は炎上中，黒色建物は焼失済みを表す．

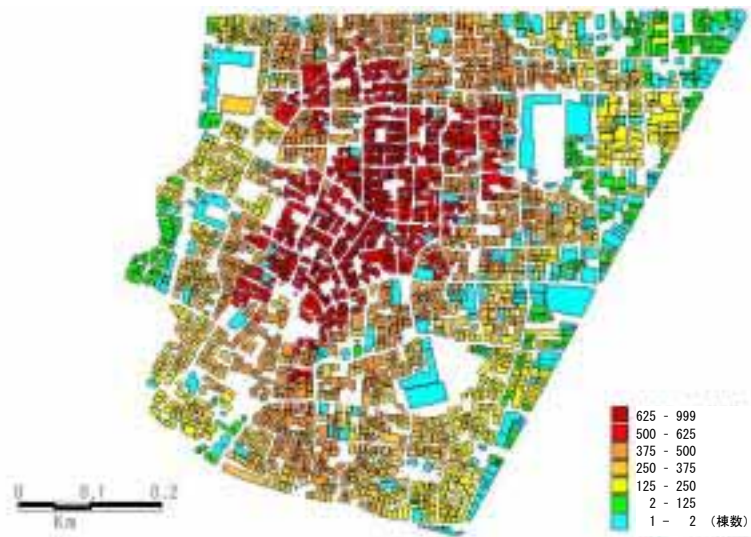


図 1-8 戸別建物データによるシミュレーション手法の問題点（2）：地区内から1件出火するとし，すべての出火パターンについてシミュレーションを行い，3時間までの焼失棟数で出火建物を色分けした図である．こうした計算には，多大な計算時間を要する．

1.2.4 まとめ

本節をまとめると、以下のようになる。

- ・ 市街地指標による評価方法は、広い範囲を対象とすることはできるが、市街地特性が指標値に集約されるため、評価誤差が大きくなる。市街地及び延焼過程のモデル化が単純なため、評価誤差が大きくなる。
- ・ シミュレーションによる評価手法は、メッシュデータを用いた場合および戸別建物データを用いた場合の双方に共通して、出火点の恣意性を排除するのが困難である。
- ・ メッシュデータを用いたシミュレーションは、広い範囲を対象とすることができるが、メッシュ内を一様な市街地とみなされるため、市街地の空間特性を反映しきれないことによる評価誤差が存在する。
- ・ 戸別建物データを用いたシミュレーションは、空間特性が反映するため評価精度は高いが、計算時間を要するため、広い範囲を対象とすることができない。

1.3 本研究で構築する評価手法

本研究において構築すべき評価方法は、目的にあるように日本全国を対象とし、市街地の空間特性を反映する精度の高い評価方法である。既存の手法との対比で整理すれば、図 1-9 に示すような位置づけの方法となる。すなわち、市街地指標を説明変数とする関数やメッシュデータによるシミュレーション手法よりも市街地の空間特性を評価結果に適切に反映すること、ただし、全国の市街地を対象としたときに現実的な時間で計算可能であることが条件となる。さらに出火点の恣意性が排除された、出火・延焼のプロセスを統合した評価方法である（図 1-9、図 1-10）。

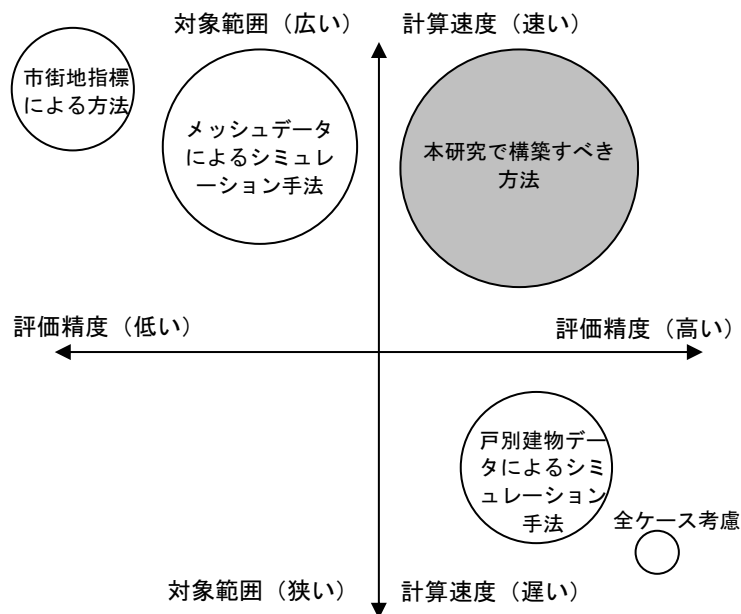


図 1-9 既往手法に対する本手法の位置づけ

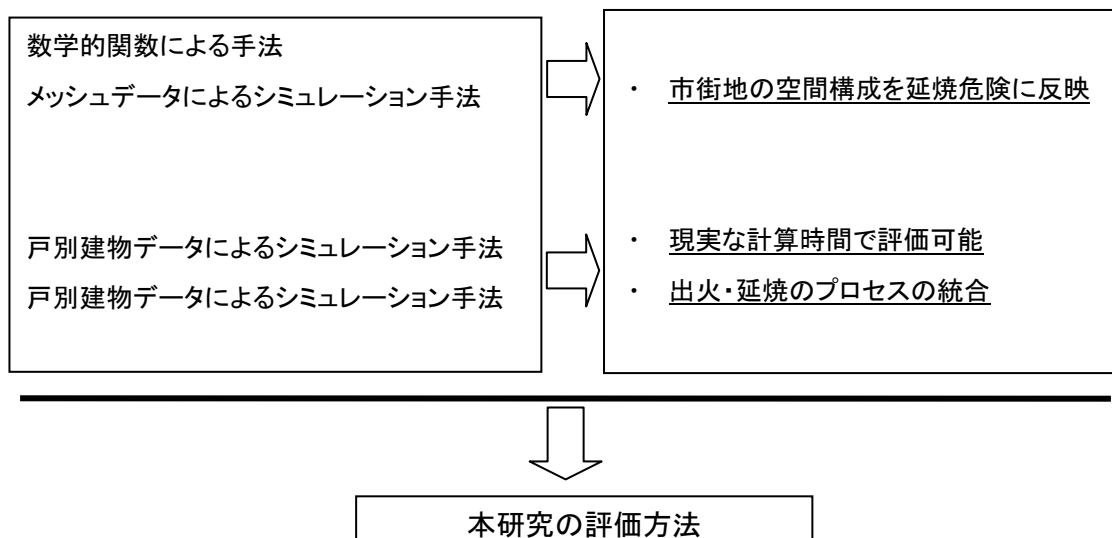


図 1-10 本研究で構築すべき延焼危険の評価方法

1.4 本研究の評価手法の概要と特徴

本研究では、市街地の空間特性を評価に反映させるために戸別建物データを用いることとし、計算時間を縮減するために延焼過程を簡素化した評価方法を構築した。データとして全国的に整備されている市販の地図データを用いた。延焼過程のモデル化については、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」⁹⁾の中で延焼危険のマクロ評価手法として提案されている「CVF (Covering Volume Fraction)¹⁰⁾」の考え方を参考に組み立てた。この考え方は、隣棟間の「延焼限界距離」を定義し、隣棟間隔と「延焼限界距離」との比較によって延焼の有無を判断し、隣棟間隔が「延焼限界距離」以内の連坦する建物群の大きさによって延焼危険を評価するというものである。これは、連坦する建物群の中で1件でも出火すれば、建物群に属するすべての建物が焼失することを意味している。本研究では、連坦する建物群内で出火する可能性を考慮することによって出火・延焼を統合した評価を行っており、最終的な評価値として各建物の焼失確率を出力している。

評価方法の詳細は2章に譲るが、ここでは、結果のサンプルを示すことで、本研究の評価方法とその特徴を示しておく。図 1-11 は、東京都を評価した結果である。凡例にある数値は、震源を区部直下とする想定地震における出火状況を考慮した各建物の焼失確率であり、焼失確率に応じて建物単位で色分けがなされている。西側の環状7号線沿いの密集市街地に焼失確率の高い建物群が存在することが分かる。図 1-12 は、杉並区高円寺周辺をズームアップしたものである。本手法の最大の特徴は、建物単位で焼失確率という絶対値で評価が行われている点にある。建物単位で焼失確率が与えられているので、複数の建物で構成される建物群の焼失棟数の期待値は、各建物の焼失確率の和で表すことができる。

すなわち、この方法では、メッシュ、町丁目をはじめとする、任意の集計単位で焼失棟数の期待値を求めることができるのである。図 1-13 の例は、地域標準メッシュ（第3次地域区画）で集計したものである。また、建物の属性毎に集計すれば、属性別の焼失棟数を求めることができる。例えば、構造別の焼失棟数を任意の集計単位で求めることもできる。本手法による評価結果は、このように加工しやすく、非常に汎用性の高いものと言える。

本研究の手法の特徴をまとめると、以下のようになる。

- 建物単位で評価されること
- 出火を考慮した焼失確率で評価し、出火と延焼のプロセスが統合されていること
- 各建物は焼失確率という絶対値で評価されること
- 焼失確率の集計により焼失棟数という絶対値で評価されること
- 任意の集計単位で集計することができること
- 建物の属性毎に集計すれば、属性別の焼失棟数を求めることができること

本研究では、全国すべての地域をデータベース化し、地域標準メッシュ（第3次地域区画）で出火確率が与えられれば、数秒単位で焼失確率を求めるシステムを構築している。

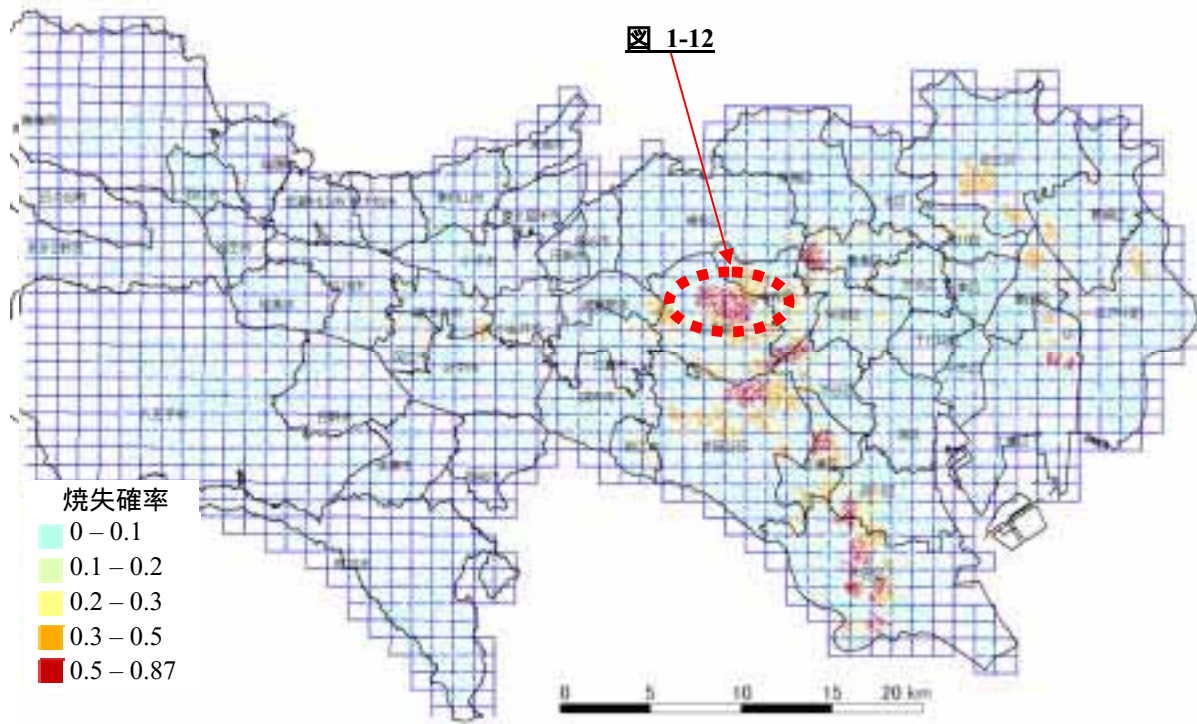


図 1-11 本手法による評価結果：各建物の焼失確率（東京都地震被害想定²⁾の区部直下地震）

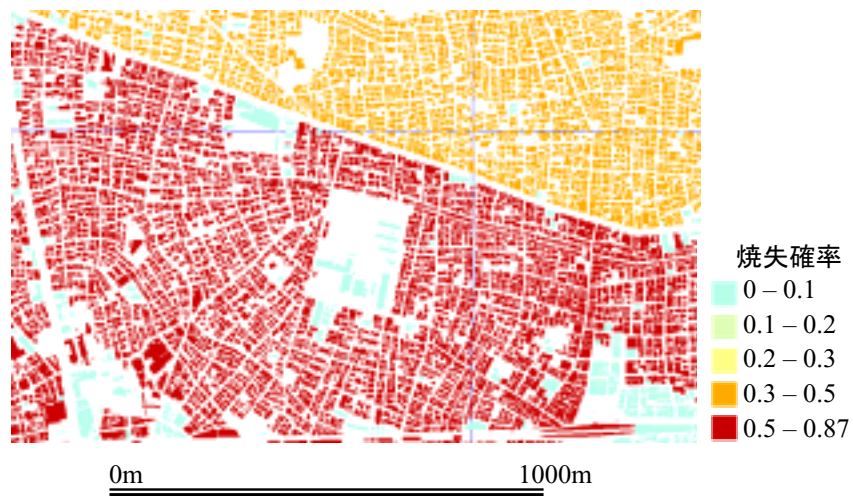


図 1-12 本手法による評価結果（杉並区高円寺周辺）：図 1-11 をズームアップしたもの、各建物の焼失確率に応じて色分けされたものである。

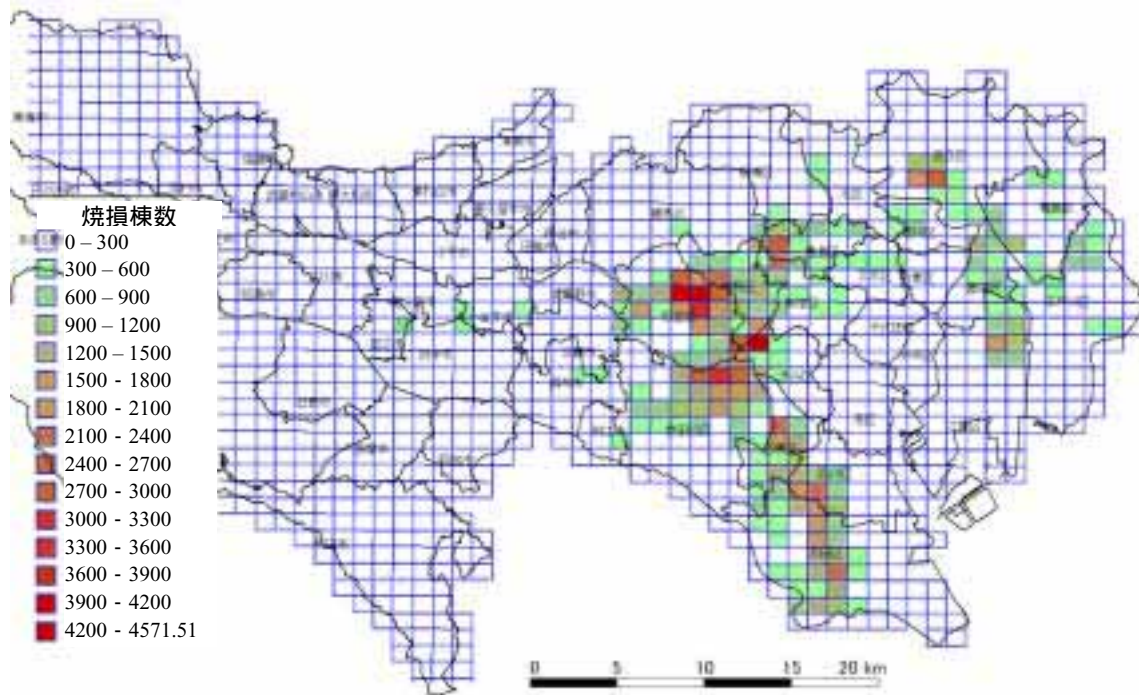


図 1-13 本手法による評価結果（東京都地震被害想定²⁾の区部直下地震）：地域標準メッシュ（第3次地域区画）別の焼失棟数の期待値 図 1-11 の各建物の焼失確率を地域標準メッシュ（第3次地域区画）で集計した得た焼失棟数の期待値。

1.5 報告書の構成

1章では、既存手法の特質を整理した上で、本研究で構築する評価手法の位置づけを示した。また、評価手法の概要、評価結果を示すことにより本手法の特徴を示した。2章では、本研究での評価手法を解説する。3章では、本手法による評価結果と既往の評価等との比較を通して、本手法の妥当性を検証する。4章では、本研究の手法による評価結果を市街地の特性にあわせて示す。さらに、関東大地震の再来、東海・東南海・南海地震の同時発生 of 2 ケースについて、全国を対象とした評価結果を示す。最後に5章では、まとめとして本研究における今後の課題と展望を述べる。

参考文献

- 1) 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>
- 2) 東京都：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書，1997.
- 3) 建設省：都市防火対策手法の開発報告書，1982.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 藤田隆史：大震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.
- 7) 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.
- 8) 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ー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.
- 9) 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.
- 10) 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.