

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	大地震時の市街地被害状況下における消防隊の出場支援に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	廣川典昭
Author(English)	Noriaki Hirokawa
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10672号, 授与年月日:2017年9月20日, 学位の種別:課程博士, 審査員:大佛 俊泰,灘岡 和夫,樋口 洋一郎,三上 貴正,鍵 直樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10672号, Conferred date:2017/9/20, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

東京工業大学大学院
情報理工学研究科 情報環境学専攻
平成 29 年度 博士論文

大地震時の市街地被害状況下における 消防隊の出場支援に関する研究

指導教員 大佛 俊泰 教授
提出者 大佛研究室 廣川 典昭

論文概要

首都直下地震時には、現状の消防力を大きく上回る数の火災が発生すると考えられている。しかし、発生する火災は、街区全体を焼失させるような危険な火災から、自然に鎮火する火災まで様々であると考えられる。すなわち、最終的な焼失被害を低減するという観点からは、より深刻な延焼被害の原因となる火災を見極め、優先的に消防活動を行うことが求められる。加えて、市街地被害状況下では、消防隊の火災現場への到着が遅れること等により、出場した火災の延焼阻止に失敗する可能性も増加する。

そこで本研究では、大地震時の市街地被害状況下での消防隊の出場（出場先決定と火災現場までの移動）支援に関する検討を行った。従来までの出場先決定戦略の代表である、発災から一定時間待機し、危険な火災の発生に備えるという戦略では、待機後に発生した火災に対応できないことや、待機中に延焼が進行することで、延焼阻止に失敗する可能性が高くなる。そこで本研究では、未知である全ての火災集合の中での、通報された火災の延焼危険性の順位を予測することで、即時出場の必要性を判断するという戦略を提案した。そして提案手法により、従来手法よりも焼失被害を大幅に低減できることを示した。さらに、消防隊の火災現場までの移動を効率化するために、道路閉塞（通行不能道路）状況の把握と断水状況下での消火栓利用を提案し、これらの移動支援戦略が、延焼阻止失敗に起因する焼失棟数へ与える効果を検証した。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、多くの方々にご指導ならびにご助言、ご協力をいただきました。特に、恩師である東京工業大学環境・社会理工学院教授 大佛俊泰博士に心から感謝の意を表します。大佛俊泰先生には、研究の細かな内容や体裁のみならず、地震防災という繊細なテーマを扱う上でのマナーや配慮にまで、厳しくも優しい指導を賜りました。ここに厚くお礼申し上げる次第です。

また、研究過程で、何度もご助言をいただきました、東京工業大学環境・社会理工学院 沖拓弥助教に、感謝の意を表します。

第四章の延焼被害の推定につきましては、東京理科大学教授 関澤愛博士に、消防活動や延焼に関する貴重なご意見をいただきました。また、関澤愛博士には、博士として生きていく上でのご指導も賜りました。深く感謝いたします。また、第五章の消防活動モデルの構築にあたり、東京消防庁 中野孝雄博士をはじめ、東京消防庁の皆様より、貴重なご意見をいただきました。さらに、本研究で利用している消防関係のデータにつきましても、ご提供いただきました。ここに感謝の意を表します。また、本論文で使用した建物データに関しては、東京都都市整備局の皆様よりご提供いただきました。感謝いたします。

本論文の多くの部分は、日本建築学会ならびに *Journal of Disaster Research* 等の学術委員会において審査していただきました。貴重なご意見やご指摘をいただきました匿名の審査員に感謝いたします。また、日常の議論を通じて多くの示唆を頂きました東京工業大学大佛研究室の皆様にも深く感謝いたします。

最後に、研究生活を様々な面で支えてくれた数多くの友人、そして家族に心より感謝致します。

本研究は JSPS 科研費 JP16J01284 ならびに JST, CREST の助成を受けたものです。

目次

論文概要	i
謝 辞	ii
目次	iii
図表リスト	vii

第一章 序論	1
1. 研究背景と既往研究について	2
1.1 研究背景	2
1.2 大地震による市街地被害の概要	4
1.3 同時多発火災時の出場先決定に関する既往研究	4
1.4 消防隊の移動時間の評価・支援に関する既往研究	5
2. 本研究の目的と構成	7
2.1 本研究の目的	7
2.2 本研究の構成	8
3. 分析対象地域と各種データの整備状況	11
3.1 分析対象地域とシミュレーションの想定	11
3.2 日本における各種データの整備状況について	12
4. 第一章のまとめ	14
第二章 地表面応答・建物倒壊・道路閉塞モデル	15
1. 地表面応答シミュレーションモデル	16
1.1 地表面応答シミュレーションモデルの概要	16
1.2 地表面最大応答推定モデル	16
1.3 加速度応答スペクトル推定モデル	17
2. 建物倒壊シミュレーションモデル	18
2.1 建物倒壊シミュレーションモデルの概要	18
2.2 実構造・建築年代に基づく倒壊確率モデル	18
2.3 I_s 値に基づく倒壊確率モデル	20
3. 道路閉塞シミュレーションモデル	21
3.1 道路閉塞シミュレーションモデルの概要	21
3.2 全方位バッファモデル	21
3.3 道路閉塞確率モデル	21
4. 本研究で使用するモデルと東京都での推定結果	23
4.1 本研究で使用するモデル	23

4.2 地表面応答の推定結果	23
4.3 建物倒壊・道路閉塞の推定結果	25
5. 第二章のまとめ	29

第三章 消火栓の断水シミュレーションモデル 30

1. 断水シミュレーションモデルの概要	31
2. 配水管の破損確率と集計的な断水率推定モデル	31
2.1 配水管の破損箇所数の期待値	31
2.2 集計的な断水率推定モデル	32
3. 到達可能性解析による消火栓の断水モデル	33
3.1 配水管網の構造推定	33
3.2 配水管の破損確率モデル	35
3.3 到達可能性解析による断水した消火栓の推定	35
3.4 東京都でのシミュレーション結果	36
4. 第三章のまとめ	38

第四章 建物出火・市街地延焼モデル 39

1. 建物出火・市街地延焼モデルの概要	40
2. 用途別出火確率モデル	40
3. 延焼シミュレーションモデル	41
3.1 マイクروسケール延焼シミュレーションの概要	41
3.2 防火・耐火性能に基づく延焼速度式	41
3.3 炎上領域の拡大に伴う延焼速度の加速効果	42
4. 延焼クラスタモデル	44
4.1 延焼クラスタモデルの概要	44
4.2 延焼限界距離の概要	44
5. 大規模延焼シミュレーションの実現と延焼危険性指標の提案	46
5.1 大規模延焼シミュレーションモデルの必要性	46
5.2 大規模延焼シミュレーションモデル	47
5.3 最短経路探索アルゴリズムに基づく大規模延焼シミュレーションの実現	48
6. 建物単位の延焼危険性指標の提案	50
6.1 延焼ポテンシャル	50
6.2 焼失ポテンシャル	51
7. 延焼阻止可能な限界到着時間の推定	52
7.1 限界到着時間の概要と火面周長	52
7.2 限界到着時間の推定	53

8. 本研究で使用するモデルと東京都での推定結果	54
8.1 本研究で使用するモデル	54
8.2 出火モデルによる出火件数の推定結果	54
8.3 延焼ポテンシャルの推定結果	55
8.4 焼失ポテンシャルの推定結果	57
8.5 限界到着時間の推定結果	61
9. 第四章のまとめ	62

第五章 消防活動モデル 64

1. 大地震時の消防運用について	65
2. 同時多発火災時における出場先決定モデル	67
2.1 同時多発火災時の出場先決定モデルの概要	67
2.2 火災予防審議会を参考とした一時待機	68
2.3 延焼ポテンシャルに基づく最適な即時出場基準の推定	69
3. 市街地被害を考慮した消防隊の移動モデル	72
4. シミュレーションの想定	74
5. 第五章のまとめ	75

第六章 出場先決定支援と焼失棟数低減効果との関係 76

1. 非出場（放任）火災による焼失棟数	77
1.1 出場先決定戦略の意義とシミュレーション条件	77
1.2 一時待機による効果と限界	77
1.3 管轄内最適化による焼失棟数の低減効果	78
1.4 管轄内最適化のリスクと課題	80
2. 地震規模に応じた戦略の有効性の検証	85
2.1 地震規模に応じた出場先決定戦略の検証を行う意義	85
2.2 異なる地震規模での被害状況の推定	85
2.3 地震規模による焼失棟数への影響	87
3. 通報情報の位置情報誤差に関する検証	90
3.1 位置情報誤差の概要	90
3.2 位置情報誤差が焼失棟数へ及ぼす影響	91
3.3 平均延焼ポテンシャルの利用による焼失棟数の低減効果	95
4. 第六章のまとめ	99

第七章 消防隊移動支援と延焼阻止との関係 101

1. 消防隊の移動支援の概要	102
2. 道路閉塞が消防隊の移動に及ぼす影響	102

2.1	消防隊の移動時間短縮の重要性	102
2.2	道路閉塞が移動時間・焼失棟数へ与える影響	103
2.3	緊急輸送道路の沿道建物耐震化による移動時間・焼失棟数の低減効果	107
2.4	道路閉塞情報による移動時間・焼失棟数の低減効果	109
3.	地域住民による道路閉塞情報収集の効果	112
3.1	早期災害情報収集の概要	112
3.2	早期災害情報収集行動モデル	113
3.3	情報収集方法による閉塞把握率の差異	117
3.4	情報収集を行う人数と消防隊の移動時間の低減効果	118
3.5	目の道路状況のみを投稿する場合の効果	121
4.	断水状況を考慮した消火栓の利用可能性	122
4.1	消火栓の利用可能性分析の概要	122
4.2	消火栓利用による焼失棟数の低減効果	123
4.3	断水した消火栓による焼失棟数への影響	127
4.4	水圧測定機器に基づく断水状況の把握による焼失棟数の低減効果	128
4.5	断水状況下での消火栓の利用可能性の検討	130
5.	第七章のまとめ	131
第八章 結論		133
1.	本研究のまとめ	134
2.	今後の課題	136
参考文献		138
関連する研究業績		142
	学術雑誌発表論文（査読あり）	142
	国際会議における発表（査読あり）	142
	国際会議における発表（査読なし）	142
	国内会議における発表（査読なし）	143
	受賞暦	144

図表リスト

図 1.2.2-1	市街地被害シミュレーションモデルの全体像	9
図 1.3.2-1	防災科学技術研究所による表層地盤データ	12
図 1.3.2-2	建物データ（防火・耐火性能）と道路ネットワークデータの例	14
表 1.3.1-1	シミュレーションの想定	11
表 1.3.1-2	震源断層パラメータの想定	12
図 2.2.2-1	木造建物の倒壊確率（全壊のみ）	19
図 2.3.3-1	道路と沿道建物集合の関係	22
図 2.4.2-1	PGV の空間分布	24
図 2.4.2-2	PGA の空間分布	24
図 2.4.2-3	計測震度の空間分布	25
図 2.4.2-3'	計測震度の空間分布（レンジを計測震度 5.9 以上に変更）	25
図 2.4.3-1	建物倒壊と道路閉塞の例	26
図 2.4.3-2	建物倒壊率の空間分布	26
図 2.4.3-3	車両閉塞率の空間分布	27
図 2.4.3-4	建物倒壊率に対する車両閉塞率の倍率	28
図 2.4.3-5	完全閉塞率の空間分布	28
表 2.2.2-1	建物倒壊確率の回帰係数（全壊のみ）	19
図 3.2.1-1	東京都被害想定による液状化指数の推定値	32
図 3.3.1-1	断水シミュレーションモデルの概要	34
図 3.3.1-2	断水シミュレーションの模式図	34
図 3.3.3-1	浄水場位置と担当する給水エリア	36
図 3.3.4-1	断水率の空間分布	37
図 3.3.4-2	到達可能性解析による消火栓の断水モデルと被害想定と比較	37
図 4.5.2-1	延焼限界距離による隣棟関係の記述例	47
図 4.5.3-1	延焼シミュレーションのイメージ	49
図 4.6.1-1	延焼ポテンシャルと焼失ポテンシャルの推定手順	51
図 4.7.1-1	火面周長の近似方法	52
図 4.7.2-1	限界到着時間の推定方法の例	53
図 4.8.2-1	平均出火件数の空間分布	54
図 4.8.2-2	ポンプ車台数－平均出火件数の空間分布	55
図 4.8.3-1	東京湾北部地震時の延焼ポテンシャルの空間分布	56

図 4.8.3-2	工学的基盤に一律 30cm/sec の想定での 延焼ポテンシャルの空間分布	56
図 4.8.4-1	工学的基盤に一律 30cm/sec の想定での 焼失ポテンシャルの空間分布	58
図 4.8.4-2	出火確率に対する焼失ポテンシャル（焼失確率）の比率	59
図 4.8.4-3	出火確率に対する焼失ポテンシャル（焼失確率）の比率のヒストグラム	59
図 4.8.4-4	東京都の火災危険度と焼失ポテンシャルの比較	60
図 4.8.4-5	火災危険度による順位と焼失ポテンシャルによる順位の比較	61
図 4.8.5-1	限界到着時間の空間分布	62
図 5.1-1	消防活動モデルの全体像	66
図 5.1-2	出火時刻の累積分布	66
図 5.2.2-1	推定した震災出場区	68
図 5.2.3-1	γ_k の空間分布	71
図 5.2.3-2	管轄ごとの最適な即時出場基準となる延焼ポテンシャルの空間分布	71
図 5.3-1	消防隊移動モデルの詳細	73
表 5.4-1	シミュレーションの想定	74
図 6.1.3-1	出場先決定戦略と非出場（放任）火災による焼失棟数（Ⅰ）閉塞なし	78
図 6.1.3-2	出場先決定戦略と平均焼失棟数（Ⅰ）閉塞なし	79
図 6.1.3-3	出場先決定戦略と平均焼失棟数（Ⅱ）閉塞あり	79
図 6.1.4-1	出場先決定戦略と平均放任火災数	81
図 6.1.4-2	(C) 管轄内最適化での非出場となったポンプ車台数の空間分布	81
図 6.1.4-3	出火件数の標準偏差の空間分布	82
図 6.1.4-4	(C) 管轄内最適化での非出場（放任）火災による焼失棟数の空間分布	82
図 6.1.4-5	(A) 通報順での非出場（放任）火災による焼失棟数の空間分布	83
図 6.1.4-6	(B) 一時待機での非出場（放任）火災による焼失棟数の空間分布	83
図 6.1.4-7	(D) 全出火把握での非出場（放任）火災による焼失棟数の空間分布	84
図 6.2.2-1	地震規模による平均道路閉塞率の推移	86
図 6.2.2-2	地震規模による平均出火件数の推移	86
図 6.2.3-1	各戦略での非出場（放任）火災による 焼失棟数（Ⅱ）閉塞あり，M6.8	87
図 6.2.3-2	各戦略での平均焼失棟数（Ⅱ）閉塞あり，M6.8	88
図 6.2.3-3	各戦略での非出場（放任）火災による 焼失棟数（Ⅱ）閉塞あり，M7.8	89
図 6.2.3-4	各戦略での平均焼失棟数（Ⅱ）閉塞あり，M7.8	89
図 6.3.1-1	位置情報誤差を伴う場合の出場先決定例	91
図 6.3.2-1	(D) 全出火把握における非出場（放任）火災による焼失棟数 (位置情報誤差：なし)	92
図 6.3.2-2	位置情報誤差が非出場（放任）火災による焼失棟数へ及ぼす影響 (位置情報誤差：10m)	93

図 6.3.2-3	位置情報誤差が非出場（放任）火災による焼失棟数へ及ぼす影響 （位置情報誤差：65m）	93
図 6.3.2-4	東京都区部と市部での建物密度の差異	94
図 6.3.2-5	不燃建物割合と非出場（放任）火災による焼失棟数の増加量との関係	94
図 6.3.2-6	位置情報誤差と非出場（放任）火災による焼失棟数との関係	95
図 6.3.3-1	平均延焼ポテンシャルに基づく出場先決定例	96
図 6.3.3-2	平均延焼ポテンシャル（75m 集計）の 非出場（放任）火災による 焼失棟数の低減効果（位置情報誤差：10m）	97
図 6.3.3-3	平均延焼ポテンシャル（75m 集計）の 非出場（放任）火災による 焼失棟数の低減効果（位置情報誤差：65m）	98
図 6.3.3-4	位置情報誤差と平均延焼ポテンシャルによる 非出場（放任）火災による焼失棟数との関係	98
図 6.3.3-4'	位置情報誤差と平均延焼ポテンシャルによる 非出場（放任）火災による焼失棟数との関係（拡大）	99
図 7.2.2-1	(C) 管轄内最適化での(I) 閉塞なしにおける平均到着時間の空間分布	104
図 7.2.2-2	(C) 管轄内最適化での(II) 閉塞ありにおける平均到着時間の空間分布	104
図 7.2.2-3	(C) 管轄内最適化での(I) 閉塞なしにおける最大到着時間の空間分布	105
図 7.2.2-4	(C) 管轄内最適化での(II) 閉塞ありにおける最大到着時間の空間分布	105
図 7.2.2-5	(C) 管轄内最適化での(I) 閉塞なしにおける 延焼阻止失敗による焼失棟数の空間分布	106
図 7.2.2-6	(C) 管轄内最適化での(II) 閉塞ありにおける 延焼阻止失敗による焼失棟数の空間分布	106
図 7.2.3-1	東京都内の緊急輸送道路の空間分布	107
図 7.2.3-2	(C) 管轄内最適化での(III)緊急輸送道路の沿道建物整備済みにおける 平均到着時間の空間分布	108
図 7.2.3-3	(C) 管轄内最適化での(III)緊急輸送道路の沿道建物整備済みにおける 最大到着時間の空間分布	108
図 7.2.3-4	(C) 管轄内最適化での(III)緊急輸送道路の沿道建物整備済みにおける 延焼阻止失敗による焼失棟数の空間分布	109
図 7.2.4-1	(C) 管轄内最適化での(IV) 閉塞把握における平均到着時間の空間分布	110
図 7.2.4-2	(C) 管轄内最適化での(IV) 閉塞把握における最大到着時間の空間分布	110
図 7.2.4-3	(C) 管轄内最適化での(IV)閉塞把握 における 延焼阻止失敗による焼失棟数の空間分布	111
図 7.2.4-4	(C) 管轄内最適化における道路状況による 延焼阻止失敗による焼失棟数の変化（東京都全域）	111
図 7.3.2-1	避難収集モデル	115

図 7.3.2-2	無作為収集モデル	116
図 7.3.3-1	情報収集を行う時間と閉塞把握率の関係	118
図 7.3.4-1	情報収集を行う人数と閉塞把握率との関係	119
図 7.3.4-2	情報収集を行う人数と消防隊の移動時間との関係（平均値）	119
図 7.3.4-3	情報収集を行う人数と消防隊の移動時間との関係（最大値）	120
図 7.3.4-4	情報収集を行う人数と延焼阻止失敗による焼失棟数との関係	120
図 7.3.5-1	目前の調査のみを行う場合の情報収集を行う人数と閉塞把握率の関係	121
図 7.4.2-1	延焼阻止失敗による焼失棟数の空間分布 （①消火栓利用なし：防火水槽や河川のみ利用）	123
図 7.4.2-2	消火栓以外の消防水利の配置密度	123
図 7.4.2-3	消火栓の配置密度	124
図 7.4.2-4	延焼阻止失敗による焼失棟数の差分 （①消火栓利用なし—②消火栓利用あり：断水なし）	124
図 7.4.2-5	延焼阻止失敗による焼失棟数の差分と断水率との関係 （①消火栓利用なし—②消火栓利用あり：断水なし）	125
図 7.4.2-6	延焼阻止失敗による焼失棟数の差分と消火栓以外の配置密度との関係 （①消火栓利用なし—②消火栓利用あり：断水なし）	125
図 7.4.2-7	延焼阻止失敗による焼失棟数の差分と消火栓の配置密度との関係 （①消火栓利用なし—②消火栓利用あり：断水なし）	126
図 7.4.3-1	延焼阻止失敗による焼失棟数の差分 （①消火栓利用なし—③消火栓利用あり：断水あり）	127
図 7.4.3-2	延焼阻止失敗による焼失棟数の差分と断水率との関係 （①消火栓利用なし—③消火栓利用あり：断水あり）	127
図 7.4.4-1	延焼阻止失敗による焼失棟数の差分 （①消火栓利用なし—④消火栓利用あり：断水把握）	128
図 7.4.4-2	延焼阻止失敗による焼失棟数の差分と断水率との関係 （①消火栓利用なし—④消火栓利用あり：断水把握）	129
図 7.4.5-1	消火栓利用の有無と消防隊の到達可能性の差異	130

第一章

序論

1. 研究背景と既往研究について

1.1 研究背景

大地震発生時の同時多発火災への対応は深刻な課題である。特に、現状の消防力を上回る出火件数が想定されている場合には、すべての火災を鎮圧できるとは限らない。すべての火災を鎮圧することにこだわれば、判断の遅れやミスにつながり、また、消防資源が分散することで本来鎮圧できたであろう火災ですら延焼阻止に失敗する可能性もある。一方で、発生する火災は、街区全体を焼失させるような危険なものから、耐火性能が高く自然に鎮火するような火災まで様々であることが判明している。すなわち、同時多発火災時における限られた消防資源の最適配分という観点からは、覚知された火災の中から延焼危険性の高い火災を特定し、優先的に消防活動を行うことが重要であると考えられる。

このような戦略の一例として、災害時医療におけるトリアージ[1]がある。トリアージとは、大事故や大規模災害時において、傷病者数が医療従事者数を圧倒的に上回る場合に行われる傷病者の選別行為である。傷病者の優先順位は重症度に基づき決定され、例えば、優先順位の高いものから「最優先治療群」「非緊急治療群」「軽処置群」「不処置群（救命が不可能）」に分けられる[1]。トリアージのように、大規模災害時とはいえ、優先度をつける等で選別を行う行為の是非については議論の余地があると考えられる。しかし、議論を行うための材料として、同時多発火災時におけるトリアージ戦略の効果を定量的に検証しておくことの意義は大きい。

また、このような問題以外にも同時多発火災と災害時医療には、以下のような差異があるため、これまで同時多発火災への対策として出場先決定戦略の重要性が指摘されてこなかったとも考えられる。

(I) 延焼危険性の把握

傷病者の場合には外傷や呼吸の有無等、傷病者単体で優先度が決定される。しかし、市街地延焼はその名の通り、その建物の防火・耐火性能のみでなく、周辺建物の特性や広幅員道路や公園等の空地の有無等が複雑に絡みあうため、絶対的な延焼危険性を把握することも容易ではない。

(II) 地域や地震ごとに異なる優先度

市街地ごとに延焼危険性の分布は大きく異なるため、同じ延焼危険性であっても、例えば、オフィス地域では延焼危険性が高いとされ、木造密集市街地では、(相対的に)延焼危険性が低いとされることがあり得る。また、地震規模によって、延焼危険性の高い建物からの出火件数等も異なるため、優先度の見極めを困難としている。

(III) 火災現場への移動

災害時医療では、医療拠点へ傷病者が運び込まれるのが一般的である。また、医療従事者

が移動する場合であっても、傷病者は災害現場付近に密集しているため、選別から活動開始までの時間的なロスは少ない。一方、同時多発火災では、消防隊が管轄内の隅々にまで移動しなければならないため、出場後に目的地となる火災現場を切り替えることは困難となる。

(IV) 不確定な母集団と時間的な制約

出場先決定時点で選別対象のすべてを把握できないという問題もある。同時多発とはいえ、最初の火災が発生してから、最後の火災が発生するまでには、数時間かかると考えられている。しかし、延焼阻止を成功させるためには、数分単位での行動が求められるため、出場先を決定する際には、出火建物の母集団が不確定なまま優先順位を決定しなければならない。

加えて、大地震発生時には、道路閉塞による消防隊の到着の遅れや消火栓の断水等が発生すると考えられる。すなわち、延焼危険性の高い火災に出場できたとしても、到着が遅れることで延焼阻止に失敗し、多大な焼失被害となることも考えられる。この問題に対して、例えば東京都は、広域移動を円滑にするために緊急輸送道路沿道建築物の耐震化を促進する条例[2]を制定し、優先的に重要道路の整備を行っている。緊急輸送道路とは、震災時の避難や救急消防活動、緊急支援物資の輸送等を円滑に行うために必要とされる重要な道路である。その中でも特に重要とされる特定緊急輸送道路の沿道建築物の耐震化の際には、耐震化状況の報告や耐震診断の実施義務が課されており、耐震化の際には助成も行われている。しかし、実際の沿道建築物の耐震化については、努力義務に留まっており、住民との合意形成や、事業としての採算が取れないこと等の問題があるため、沿道建築物の耐震化は必ずしも順調に進んでいるとはいえない。したがって、首都直下地震発生の切迫性を考えれば、耐震化や不燃化の推進と並行して、道路閉塞や消火栓の断水等の市街地被害の発生を前提とした消防活動戦略について検討しておくことの意義は大きい。

1.2 大地震による市街地被害の概要

兵庫県南部地震（1995）、新潟県中越沖地震（2007）、東北地方太平洋沖地震（2011）等、この20年余りの期間に我が国は多くの大地震を体験している。これらの経験を活かすため、防災や減災の観点から建築構造や防火に関する様々な物的被害推定モデルが考案され、被害想定や減災対策の検討等に活用されている。

首都直下地震時に予想される市街地被害としては、①建物倒壊や通行不能道路（道路閉塞）、②消火栓の断水、③出火や市街地延焼があげられる。また、市街地被害ではないが、これらの市街地被害を推定する上で、地表面における地震応答の推定モデルも重要な役割を担う。なお、ここで市街地被害に関する既往研究の詳細について述べると煩雑になるため、各章のはじめにまとめてある。しかしながら、市街地被害推定モデルの研究は分野ごとに独立している場合が多く、体系的な活用がなされていないのが現状である。また、消防活動戦略を検討する上で重要となる、市街地延焼や断水状況の推定モデルでは、広域の市街地における精緻なシミュレーションモデルはない。

1.3 同時多発火災時の出場先決定に関する既往研究

大地震時の同時多発火災時における消防隊の出場先決定戦略に関しては、多くの優れた研究蓄積がある。例えば、藤井・糸井川[3]は、250mメッシュで仮想的な市街地をモデル化した上で、住民による駆けつけや消防機関による巡回等の情報収集方法や消防運用方法と延焼面積の関係に着目し分析を行っている。出場先決定方法としては「覚知順」「延焼危険度順」「鎮圧可能順」の三戦略を検討しており、「延焼危険度順」「鎮圧可能順」では、覚知から一定時間以内（5～20分間以内）に覚知された火災を対象としている。また、個々の建物の防火・耐火性能や詳細な市街地特性を考慮しておらず、覚知された位置情報等についても正確であることを仮定している。

火災予防審議会[4]では、覚知行動や消防隊の参集行動、ホースの延焼時間等まで考慮した精緻なシミュレーションモデルを用いて分析を行っている。また、東京消防庁の延焼危険度[5]等に基づき東京都全域を、震災第一出場区から第五出場区に分類し、避難場所周辺等に存在する震災第一・第二出場区からの出火には即時出場し、それ以外の場合は15分待機し、優先度の高い出場区の火災から出場するという消防戦略について検討している。さらに、待機時間を30分間まで延長した場合についても検討しており、木造住宅密集地域以外ではわずかに焼失被害を低減できることを示している。加えて、出火件数も想定の1.5倍を上限として分析しているため、想定よりも大規模な地震が発生した場合であっても対応できる可能性がある。

この 2 つの研究[3,4]は、平均的な延焼危険性[5]の高い地域へ優先的に出場することを提案するものであると考えられる。また、出火建物の母集団が不確定な問題に対しては、火災情報を収集するために一定時間待機することで対応している。具体的には、待機時間内に覚知可能な火災のみを対象に出場先を決定している。ただし、この方法では、待機時間後に延焼危険性の高い火災から通報がきた場合に対応することが困難となる。

佐々木・関澤[6]は、建物単位の延焼危険性に基づき出場先を決定する方法について検討している。具体的には、延焼シミュレーションにより一定時間後の焼失棟数を推定し、消防隊の出場先を決定する方法について検討している。しかし、火災現場の位置情報を建物単位で特定可能と仮定しており、大地震時の混乱した状況下における、位置情報の入手の難しさについても考慮していない。さらに、暗黙的に（本来は未知であるはずの）出火建物の母集団をすべて把握できるものと仮定している。

1.4 消防隊の移動時間の評価・支援に関する既往研究

平常時の交通における移動支援や効率化を検討している研究[7]は存在するが、大地震時における消防隊の火災現場への移動に関する研究は少ない。ここでは、大地震時の移動時間に影響する要因である、①道路閉塞状況下での移動と、②消火栓の利用に関する研究について概観する。

久貝・加藤の道路閉塞に関する一連の研究[8-12]では、消防車両の活動可能区域の大きさ等から、市街地全体の道路網の防災性能を評価する手法をパーコレーション理論に基づき提案している。ただし、この手法は市街地整備の際の基準を得るものであり、発災直後の消防活動支援を対象とした研究ではない。

Wang and Zlatanova[13]は、マルチエージェントシステムを用いて、災害時の消防隊やレスキュー隊等の経路選択支援システムの開発を行っている。特に、センサーデータとハザードシミュレーションモデルにより延焼の拡大等を予測し、動的に通行不能道路が変化する場合での最適な経路探索を提案している点に特徴がみられる。しかし、汎用的な経路探索システムのため、消防隊固有の行動特性（例えば、消防水利までは車両で向かい、そこから火災現場までは消防隊が向かう等¹⁾）を考慮していない。

火災予防審議会[4]では、精緻なシミュレーションモデルを用いて分析を行っているが、道路閉塞に関しては、移動時間の評価のみを行っており、移動支援に関する検討は行っていない。また、大地震時における消火栓利用に関しては、消防隊の消火活動ではなく、地域住民による初期消火活動でのみ考慮している。さらに、断水による利用可能性の分析について

¹⁾ 移動手段により通行速度や通行可能幅員等が変化する。

は、消火件数の期待値に非断水率（ $1 - \text{断水率}$ ）を乗じる程度に留まっている．加えて、断水状況は東京都による被害想定[15]の市区町村単位の断水率に基づき推定しているため、給水地点付近の配水管の破損によって、消火栓へ配水できない可能性を考慮していない．

高田ら[14]は、兵庫県南部地震時の記録に基づき、延焼阻止の観点から消火栓が利用可能であった場合の人的被害の低減効果を分析している．ここでは、市街地特性や延焼阻止が失敗した理由（水量の不足等）、出火時刻や消防隊の到着時刻等に基づいた詳細な分析が行われており、消火栓の利用可能性を検討する上で参考となる．しかし、延焼阻止の可否については、延焼危険性指標（木造率×容積率）や市街地特性等の情報を参考とした定性的な分析に留まっており、広域での定量的な分析は困難である．また、道路閉塞による消防隊の到着遅延等に関しては考慮していない．

2. 本研究の目的と構成

2.1 本研究の目的

既往研究を概観する限りでは、同時多発火災時の出場先決定において、建物単位の延焼危険性指標に基づき、検討している研究は少ない。また、想定と異なる規模の地震が発生した場合の戦略の安全性や、混乱した状況下における覚知された火災の位置情報精度の影響については十分に検討されていない。

さらに従来までは、出火する建物集合が未知であるという問題に対して、消防署内で一定時間待機し、その間に覚知された火災のみを対象とすることで対応していた。そのため、待機時間と延焼阻止に失敗するリスクの比較から、最適な待機時間について検討する研究が多かった[3,4]。しかし、待機を伴う戦略では、待機時間内に得られる情報が少なく、待機時間を延長すると延焼阻止に失敗するという問題がある。

一方、火災現場への移動に関する研究では、道路閉塞が火災建物までの移動時間へ及ぼす影響を、マイクロスケールで分析している研究は少なく、移動支援戦略に関しても十分に検討されていない。また、断水状況を考慮した上で、消火栓の利用可能性について分析した研究も少ない。さらに、道路閉塞と断水等の複数の市街地被害状況下での分析はなされていない。

これらの問題に対応するための主要な研究課題を以下に整理してある。また、この他にも大規模シミュレーションを実現するための高速化等も重要な課題である。本研究の目的は、大地震時の同時多発火災において、消防隊の出場を支援するために、以下の研究課題に対する一連の提案を行うことである。

(I) 市街地被害シミュレーションモデルの構築

首都直下地震時に発生するとされる道路閉塞や消火栓の断水、市街地延焼等の様々な市街地被害を整理・拡張・構築し、市街地シミュレーションモデルとして統合すること。

(II) 建物単位の延焼危険性指標の構築

延焼危険性の高い火災を特定するため、建物の防火・耐火性能や市街地特性だけでなく、延焼中の建物の近傍建物等まで考慮できるマイクロスケールの延焼危険性指標を構築し、建物単位で延焼危険性の把握を行うこと。

(III) 市街地被害状況下における消防活動モデルの構築

大地震時の同時多発火災時における消防隊の出場先決定戦略や、道路閉塞・断水状況下での移動を記述するモデルを構築すること。

(IV) 同時多発火災時における有効な出場先決定戦略の提案と検証

出火する建物集合が未知である状況下での有効な出場先決定戦略について提案すること。また、既往研究で提案されている出場先決定戦略との比較によりその効果を検証すること。さらに、通報された位置情報に揺らぎがある場合や想定と異なる規模の地震が発生した場合等を想定した検証を行うこと。

(V) 市街地被害状況下での火災現場への移動支援の提案と検証

市街地被害状況下での火災現場への到着の遅れによる延焼阻止失敗について定量的な検証を行うこと。さらに、消防隊の移動を支援するための戦略について検討し、その効果を検証すること。

2.2 本研究の構成

第二章から第四章では、研究課題(I)について議論する。加えて、第四章では、研究課題(II)についても検討する。これらの成果により構築される市街地被害シミュレーションモデルの全体像を図 1.2.2-1 にまとめている。これにより、首都圏の任意の地域において、東京湾北部地震や多摩直下地震等の地震を想定した物的被害の推定が可能となる（研究課題(I)）。

第二章で、地表面での地震応答の推定から、建物倒壊、道路閉塞にいたるまでの一連の研究について体系的に整理し統合する。まず、250mメッシュ単位の表層地盤データと建物データ（位置座標）、震源の情報を地表面応答推定モデルに入力することで、建物ごとに地表面最大速度 PGV や最大加速度 PGA、加速度応答スペクトル等の地震応答を推定する。次に、これらの地震応答や建物の耐震性能に基づき建物倒壊の推定を行う。このとき使用する建物倒壊モデルにより、地表面応答推定モデルに要求される地震応答の解像度（最大応答のみ、または、応答スペクトル）は異なる。さらに、各道路について、倒壊した沿道建物の特性や道路幅員等に基づき道路閉塞状況を推定することで、避難や消防活動時に通行困難である道路を推定する。

第三章では、消火栓の断水状況の推定モデルの構築を行う。まず、地震応答と配水管特性に基づき、破損する配水管の推定を行う。次に破損した配水管を配水不能とした際の配水管網上での到達可能性を解析することで、断水する消火栓を推定する。本研究で提案する断水シミュレーションモデルでは、配水管網を考慮した推定を行うため、従来までの市区町村単位等の集計量を用いて推定する手法では困難であった、連続的な断水状況の推定が可能となる。

第四章では、まず、出火建物の推定を行う。出火建物は、地震応答や建物用途（火気器具の使用率等）に基づき推定する。次に、市街地延焼については、被害想定等で用いられている延焼クラスとマイクロスケールの延焼シミュレーションについてその特徴を比較する。

さらに、発災直後の消防活動には、時系列での延焼被害の予測や、建物単位での延焼危険性の把握が不可欠であることから、これまで困難と考えられてきた大規模延焼シミュレーションについての検討を行う。この大規模延焼シミュレーションの実現により、市街地整備や発災直後の行動支援に関係する新たな火災延焼危険性指標の構築が可能となる（研究課題(II)）。

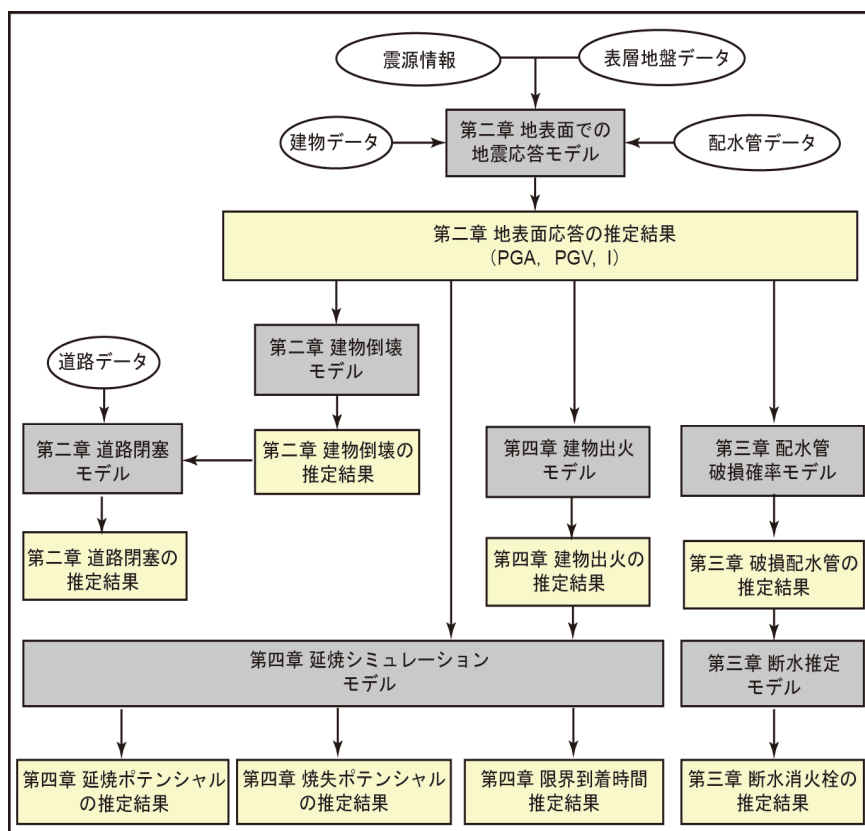


図 1.2.2-1 市街地被害シミュレーションモデルの全体像

第五章では、これまでに構築した市街地被害シミュレーションモデルにより推定される市街地被害状況下での消防活動モデルの構築を行う（研究課題(III)）。消防活動モデルは、同時多発する火災の中から、どの火災現場へ出場するかを決める出場先決定モデル（研究課題(IV)）と、その火災現場までの移動過程を記述する消防隊移動モデル（研究課題(V)）の2つに大別される。

第六章では、出場先決定戦略による非出場（放任）火災による焼失棟数の低減効果に関する分析を行う（研究課題(IV)）。まず、出火する建物集合が未知である状況下での消防隊の出場先決定モデルとして、一定時間待機し、その間に得られた情報を用いて出場先を決定する戦略（従来手法）と、建物単位の延焼危険性や出火確率に基づき（相対的な）延焼危険性を予測し、出場先を決定する戦略（提案手法）について比較・分析を行う。加えて、想定と

異なる規模の地震が起きた際の市街地被害状況を推定した上で、各出場先決定戦略の有効性についての検証も行う。さらに、大地震時の混乱状況を考慮し、入手した火災現場の位置情報に揺らぎを伴う場合についての検討も行う。

第七章では、移動時間の改善による延焼阻止失敗による焼失棟数の低減効果に関する分析を行う（研究課題(V)）。まず、道路閉塞による消防隊の火災現場への到着の遅延を定量的に評価し、延焼阻止失敗による焼失棟数の増加について分析する。また、道路閉塞情報が把握できた場合の到着時間、および、焼失棟数の低減効果について分析を行う。次に、道路閉塞情報が把握できた場合の焼失被害の低減効果が大きいことから、地域住民（自主防災組織等）による早期災害情報収集の提案とその効果の検証を行う。最後に、大地震時の断水状況下での消火栓利用と焼失棟数との関係について分析する。また、水圧測定機器の導入による効果も検証し、最終的に断水状況下での消火栓の利用可能性について検討する。

3. 分析対象地域と各種データの整備状況

3.1 分析対象地域とシミュレーションの想定

本研究で構築した市街地被害シミュレーションは、過去の被害状況や市街地特性とそこまで乖離しない範囲であれば、基本的に適用可能であると考えられる²。本研究では、特に、首都直下地震を対象に分析を行うことから、各章には、東京都全域における代表的なモデルによるシミュレーション結果を示してある。具体的には、東京都内の全建物(2,784,101 棟)と全道路(967,404 本³)⁴について、構築・統合した市街地被害シミュレーションを実行する。シミュレーション結果は、建物1棟や道路1本単位で推定可能であるが、地域特性等がわかりやすいように、基本的には500mメッシュ等で集計した値を空間分布として示してある⁵。また、市街地延焼と消火栓断水シミュレーション結果は確定的に求められるが、その推定に必要な出火建物や配水管破損が確率的に推定されるため、全体としては確率的な振る舞いとなる。そこで、すべての市街地被害について1,000回のモンテカルロシミュレーションを行い、異なる物的被害状況(建物倒壊・道路閉塞・出火・延焼・断水)を推定し、その1,000ケースの平均値について議論する。

想定する地震は、表1.3.1-1に示すように、東京湾北部を震源とするマグニチュード7.3の大地震[15](表1.3.1-2)とし、風向・風速は北風・8m/sec、湿度は50%、発災時刻は、出火件数が最も多いとされる冬の夕刻を想定する。

表 1.3.1-1 シミュレーションの想定

想定	内容
(1) 対象地域	東京都全域
(2) 地震	東京湾北部地震 (M7.3)
(3) 風向・風速	北風・8m/sec
(4) 湿度	50%
(5) 季節／発災時刻	冬季／夕刻

² ただし、後述するデータの入手可能性には差異があるため、一部の都道府県等では実行が困難である可能性はある。

³ 道路は交差点間を1本としている。

⁴ 建物データは平成23年土地利用現況調査に基づくデータ、道路データは平成26年までに東京消防庁が作成したデータを用いている。

⁵ 第六章以降の消防活動シミュレーションでは、建物や道路単位の推定結果を用いて分析を行う。

表 1.3.1-2 震源断層パラメータの想定

想定	内容
(1) 緯度・経度	35.3200・140.1400
(2) 上端深さ	フィリピン海プレートの 1km 上方
(3) 長さ・幅	63.64 (km)・31.82 (km)
(4) 走向・傾斜	296°・23°
(5) モーメントマグニチュード	7.3

3.2 日本における各種データの整備状況について

(a) 表層地盤データ

広域なエリアについてボーリング調査を実施し、N 値などの詳細な地盤データを作成することは困難である。これに変わる手段として、防災科学技術研究所により整備されている 250m メッシュ単位の表層地盤データから AVS30（地表から深さ 30m 地点での平均 S 波速度）を推定し、表層地盤特性を表現したデータがある（図 1.3.2-1）[16-19]。本研究では、この表層地盤データを用いて地震応答の推定を行う。他の地盤データとしては、東京都の被害想定で使用されている東京ガスによる 50m メッシュ単位の地盤特性データも存在するが、一般には公開されていない。

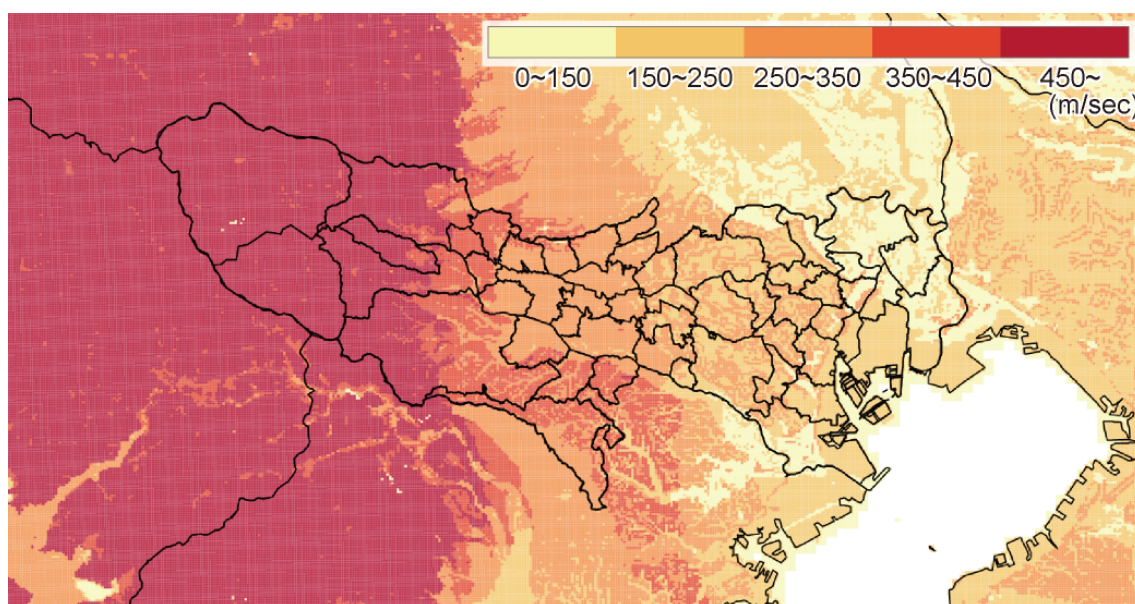


図 1.3.2-1 防災科学技術研究所による表層地盤データ（AVS30 の空間分布）
（東京都周辺を抜粋）

(b) 建物データ

精緻な建物倒壊の推定や市街地延焼の推定等を行うためには、建物外形線や位置情報のみでなく、実構造や建築年代、建物用途や防火・耐火性能等の詳細な属性情報が必要である。日本における利用可能な建物データとして、東京都都市整備局等の地方自治体が作成した土地利用現況調査のデータ（図 1.3.2-2）と東京大学空間情報科学研究センター（CSIS）による、ZmapTownII（住宅地図データベース）に基づき構築されたマイクロジオデータがある。ZmapTownII には、階数や建築面積等の最低限の情報しか含まれていないが、マイクロジオデータでは、秋山ら[20-23]により、建物倒壊推定や市街地延焼推定に必要な実構造や建築年代、防火・耐火性能の推定値が付与されている。一方、土地利用現況調査データにも、マイクロジオデータと同様に、階数や建築面積等の属性情報が含まれており、さらに防火・耐火性能や建物用途の実測値まで含んだ詳細な建物データとなっている。

本研究では、実測値の情報の豊富さから、東京都都市整備局が作成した平成 23 年土地利用現況調査に基づく建物データを用いて分析を行う。上記の属性データを用いれば、建物出火や市街地延焼の推定が可能となる。しかし、構造体や老朽化が大きく影響する建物倒壊推定に必要な実構造（木造・鉄筋コンクリート造・鉄骨造等）や構造耐震指標（ I_s 値）、建築年代の情報は含まれておらず、本研究では、これらの情報を、地域危険度調査で判明した町丁目ごとの実構造と建築年代、階数等のクロス集計データに基づき推定した。

(c) 道路ネットワークデータ

広域の避難や消防活動を記述するためには、道路間の接続関係を有するデータが必要である。日本における道路データとしては、カーナビにも搭載されているデジタル道路地図データ（DRM）がある。DRM は、交通量データ等との重ね合わせが可能であり、交通工学等との相性が良い。しかし、自動車が通行可能である道路が対象となっているため、避難時や消防活動時に重要と考えられる細街路が含まれていないという問題点がある。一方、東京都内に関しては、東京消防庁が作成した道路データがある。東京消防庁の道路データに、詳細な道路幅員情報や細街路も有する点で優れているため、本研究では平成 26 年までに東京消防庁が作成した道路データを利用する（図 1.3.2-2）。



図 1.3.2-2 建物データ（防火・耐火性能）と道路ネットワークデータの例

(d) 配水管データ

配水管網のデータは一般には入手が困難である。そこで小林ら[24]により、道路ネットワークデータから、配水管網を推定する方法が提案されている。この手法では、水道やガスなどの埋設管が主に道路の下に存在していることを利用しており、DID 地区等の水道需要の多い地区において、配水管が埋設されていない立体交差道路やデータ化されていない私道等の一部を除き、高い精度で推定が可能であることを示している。本研究では、後述するように、小林らの手法[24]を用いて配水管網の位置を推定した後、経路探索アルゴリズムを応用して配水方向を定め、配水管網の構造を推定する。

4. 第一章のまとめ

第一章では、大地震時の同時多発火災においては、現状の消防力を大きく上回る火災が発生する可能性が高いために、すべての火災を鎮圧することが困難であることを述べた。また、類似した問題構造を持つ災害時医療でのトリアージ戦略について概説し、同時多発火災においても延焼危険性の高い火災を見極め、優先的に出場することの重要性について考察した。加えて、市街地被害状況下では、道路閉塞等により消防隊の到着が遅れることで、延焼阻止に失敗する可能性があることから、火災現場までの移動支援が必要であることについても述べた。さらに、災害時医療と同時多発火災の差異について整理し、市街地被害状況下での同時多発火災時に対応するために必要な研究課題についての整理を行った。

第二章

地表面応答・建物倒壊・道路閉塞モデル

1. 地表面応答シミュレーションモデル

1.1 地表面応答シミュレーションモデルの概要

地表面での地震応答に関する研究は、(I) 地表面での最大応答に関する研究[25-27]と、(II) 加速度応答スペクトルを推定する研究[15,28]に大別される。さらに、加速度応答スペクトルを推定するモデルは、(II-i) 震源からの距離に基づく減衰効果と表層地盤での増幅効果から加速度応答スペクトルを推定する研究[28]と、(II-ii) 短周期側を統計的グリーン関数法、長周期側を波数積分法または差分法で推定する精緻なモデルに分けられる[15]。広域での分析においては、計算時間や簡便性の観点で、モデル(II-i) が有効であることから、ここでは主にモデル(I)とモデル(II-i)について述べる。

1.2 地表面最大応答推定モデル

想定地震 E による建物 B の地表面での最大速度 $PGV(B,E)$ と、最大加速度 $PGA(B,E)$ を推定するために、まず式(1)、式(2)により、S 波速度が 600m/sec 相当となる地盤での最大速度 $PGV_{600}(B,E)$ (cm/sec)、及び、最大加速度 $PGA_{600}(B,E)$ (cm/sec²)を推定する[25]。両式とも建物 B と断層面との距離として断層最短距離 $X(B,E)$ (km)を用いた式を記す。

$$\begin{aligned} \log_{10} PGV_{600}(B,E) \\ = 0.58M_W(E) - \log_{10}(X(B,E) + 0.0028 \cdot 10^{0.50M_W(E)}) - 0.002X(B,E) \\ + 0.0038h(E) - 1.29 + d(E) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \log_{10} PGA_{600}(B,E) \\ = 0.50M_W(E) - \log_{10}(X(B,E) + 0.0055 \cdot 10^{0.50M_W(E)}) - 0.003X(B,E) \\ + 0.0043h(E) + 0.61 + d(E) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし、 $M_W(E)$ はモーメントマグニチュード、 $h(E)$ は、断層面の平均的な深さ(km)、 $d(E)$ は地震タイプ別の係数であり、地殻内：0.00、プレート間：-0.02、プレート内：0.12 となる。これらは、建物 B に依存せず、地震 E ごとに定まる。次に、建物 B の存在する表層地盤の特性である $AVS30(B)$ を用いて、基準地盤から地表面までの増幅度 $ARV(B)$ 、 $ARA(B)$ を推定する(式(3)、式(4)) [26]。

$$\log_{10} ARV(B) = 1.83 - 0.66 \cdot \log_{10}(AVS30(B)) \pm 0.16 \quad (3)$$

$$\log_{10} ARA(B) = 1.35 - 0.47 \cdot \log_{10}(AVS30(B)) \pm 0.18 \quad (4)$$

最後にこれらを掛け合わせ建物 B の $PGV(B,E)$, $PGA(B,E)$ を推定する (式(5), 式(6)).

$$PGV(B,E) = ARV(B) \cdot PGV_{600}(B,E) \quad (5)$$

$$PGA(B,E) = ARA(B) \cdot PGA_{600}(B,E) \quad (6)$$

また, 建物 B の計測震度 $I(B,E)$ は, $PGV(B,E)$ を用いて式(7)により変換する[27].

$$I(B,E) = \begin{cases} 2.165 + 2.262 \cdot \log_{10}(PGV(B,E)) & (I < 4) \\ 2.002 + 2.603 \cdot \log_{10}(PGV(B,E)) - 0.213 \cdot \log_{10}(PGV(B,E))^2 & (I \geq 4) \end{cases} \quad (7)$$

1.3 加速度応答スペクトル推定モデル

地表面での加速度応答スペクトルの推定[28]は, 最大応答と同様に 2 段階のステップに別れている. まず, S 波速度が 300m/sec 相当となる地盤上での地震 E による建物 B の加速度応答スペクトル $S_{A0}(B,T,E)$ (cm/sec²)を式(8)により推定する.

$$\begin{aligned} & \log_{10} S_{A0}(B,T,E) \\ = & \begin{cases} a_1(T)M_W(E) + b_1(T)X(B,E) - \log_{10}(X(B,E) + d_1(T) \cdot 10^{0.5M_W(E)}) + c_1(T) \pm \varepsilon_1(T) & (D(E) \leq 30km) \\ a_2(T)M_W(E) + b_2(T)X(B,E) - \log_{10}(X(B,E)) + c_2(T) \pm \varepsilon_2(T) & (D(E) > 30km) \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで, $S_{A0}(B,T,E)$ は S 波速度が 300m/sec 相当の地盤での減衰定数 5%の加速度応答スペクトル(cm/sec²)であり, $X(B,E)$ は建物 B の断層最短距離(km), T は周期, $D(E)$ は震源深さ(km), $a_1 \sim c_2$ は回帰係数, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ は予測誤差である. 回帰係数の詳細は, 文献[28]を参照されたい. 次に, 表層地盤特性 $AVS300(B)$ と回帰係数 $p(T)$, $q(T)$ を用いて, 地盤補正係数 $G(B,T)$ を推定し, 地表面での加速度応答スペクトル $S_A(B,T,E)$ (cm/sec²)へ変換する (式(9), 式(10)).

$$G(B,T) = p(T) \cdot \log_{10}(AVS300(B)) + q(T) \quad (9)$$

$$\log_{10} S_A(B,T,E) = \log_{10} S_{A0}(B,T,E) + G(B,T) \quad (10)$$

2. 建物倒壊シミュレーションモデル

2.1 建物倒壊シミュレーションモデルの概要

建物の倒壊推定を行うモデルとしては、(I) 過去の震災時被害データに基づくフラジリティカーブにより、地震の最大応答と建物の構造体や老朽化度合いから確率的に推定するモデル[29-31]と、(II) 限界耐力計算法（主に耐震設計時に用いられているモデル）を応用し、入力地震波をもとに倒壊推定を行うモデル[32]の2種類が存在する。

モデル(I)は、計算時間が短いことやデータ上の制約も少ないことから、広域での建物倒壊推定には有利である。一方、大地震による建物被害は、詳細な地震情報と建物特性に依存すると考えられ、モデル(I)の記述力が不十分である可能性もある。そのため、過去の地震時と大きく異なる条件での分析には注意を要する。

性能等価応答スペクトルに代表される限界耐力計算法に基づく建物倒壊モデル(II)は、モデル(I)より計算負荷が幾分大きいですが、町丁目程度の小規模木造住宅密集地域であれば適用事例も存在する[33]。入力データとなる地表面での加速度応答スペクトルの推定にも簡便な方法が考案されていることから、計算負荷の面では、広域での適用も実用的となってきた。しかし、モデル(II)は、木造建物での推定精度が高い反面、RC造建物での推定精度が低いことが判明しており、RC造も多く含む広域での適用は困難であることから、ここでは、モデル(I)を中心に述べる。

2.2 実構造・建築年代に基づく倒壊確率モデル

建物 B の実構造と建築年代から定まる回帰係数（表 2.2.2-1）と想定地震 E に基づき、式 (11) により倒壊確率 $P_C(B, E)$ を推定する[29,30]。その後、一様乱数を用いて、モンテカルロシミュレーションにより倒壊建物の空間分布を推定する。本研究では、東京都の地域危険度[34]と同様の手法で比較的新しい建築年代の木造建物の被害確率を修正したモデル（表 2.2.2-1）を用いる（図 2.2.2-1）。

$$P_C(B, E) = \Phi \left(\frac{\ln(PGV(B, E)) - \lambda(B)}{\zeta(B)} \right) \quad (11)$$

ここで、 $\lambda(B)$ 、及び、 $\zeta(B)$ は、回帰係数であり、実構造、建築年代、損傷度合い（全壊・半壊）ごとに与えられる。本研究では、建物が全壊した場合を倒壊として扱う。

表 2.2.2-1 建物倒壊確率の回帰係数（全壊のみ）[30,34]

		全壊	
		λ	ζ
木造	～1971	4.45	0.342
	1972～1981	4.73	0.378
	1982～1991	5.12	0.496
	1992～2001	5.68	0.496
	2002～	6.13	0.496
RC造	～1971	5.12	0.646
	1972～1981	5.33	0.575
	1982～	6.00	0.789
鉄骨造	～1971	4.64	0.619
	1972～1981	4.97	0.490
	1982～	5.64	0.731

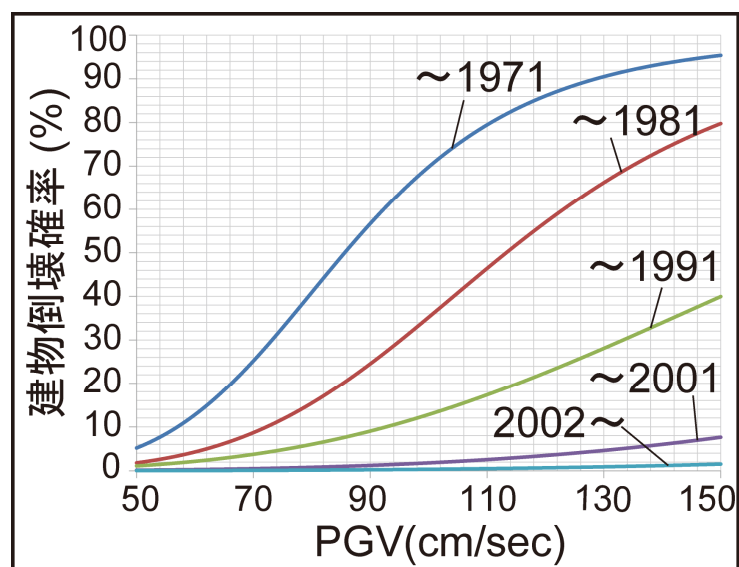


図 2.2.2-1 木造建物の倒壊確率（全壊のみ）[30,34]

2.3 Is 値に基づく倒壊確率モデル

実構造や建築年代ではなく，構造耐震指標 Is 値（2 次）を用いて，倒壊確率 $P_f(B, E)$ を推定するモデル[31]が考案されている（式(12)，式(13)，式(14)）。Is 値とは，保有性能基本指標（強度と粘り強さ）や形状，経年劣化により算出される耐震指標であり，一般に Is 値 ≥ 0.6 であれば震度 5 程度のゆれに関して中破以上の被害が生じにくいと考えられている。

$$P_f(B, E) = \Phi \left(\frac{\ln(PGV(B, E)) - \lambda_f(Is(B))}{\zeta_f(Is(B))} \right) \quad (12)$$

$$\lambda_f(is) = \ln \left(V_0 \cdot \left(\frac{is}{Is_1} \right) \right) \quad (13)$$

$$\zeta_f(is) = \zeta_{f0} \quad (14)$$

ここで， $Is(B)$ は建物 B の Is 値である． $Is_1=0.4$ ， $\zeta_{f0}=0.6$ であり， V_0 は倒壊：250cm/sec，倒壊：250cm/sec，大破：200cm/sec，中破：150cm/sec，小破：100cm/sec，軽微：50cm/sec とされている．なお，本研究で利用する建物データには Is 値の情報が含まれていないため，このモデルは使用しない。

3. 道路閉塞シミュレーションモデル

3.1 道路閉塞シミュレーションモデルの概要

道路閉塞に関する研究は、(I) 町丁目単位等での木造建物の割合や全壊率等の集計量を用いて平均的な道路閉塞状況を記述するモデル[35]と、(II) 建物倒壊に伴うガレキが倒壊建物の周辺に均一に発生することを仮定し、道路や他の倒壊建物との位置関係から幾何学的に閉塞を判定する全方位バッファモデル[36]、(III) モデル(I)[35]を見直し、ガレキ流出確率とガレキの流出量の観点から道路単位での閉塞確率を推定するモデル[37]に分けられる。本研究では、道路単位での推定を行う必要があるため、モデル(II)とモデル(III)について述べる。

3.2 全方位バッファモデル

町丁目単位等の平均的な道路閉塞状況を記述するモデル[35]は存在するが、個々の建物倒壊から前面道路の閉塞に至るまでの現象を記述しているマイクロスケールなモデルは少ない。全方位バッファモデルの特徴は、個別の建物倒壊による前面道路の閉塞現象を記述する点にある[36]。このモデルは、建物の周囲に同程度（建物高さに等しい幅）のガレキが連続的に流出することを仮定し、それを GIS 上でバッファとして表現している。これにより、各バッファ同士の重なり具合から幾何学的に道路の通行可能性を推定することが可能となる。しかし、全方位に等量のガレキが流出すると仮定している点や、シミュレーションごとにバッファの重なりを空間検索により判定するため、計算量が多くなる等の問題点がある。

3.3 道路閉塞確率モデル

地域ごとの平均的な道路閉塞状況を記述するモデル[35]を見直し、道路単位での閉塞状況を確率的に記述するモデルが、道路閉塞確率モデルである[37]。このモデルでは、まず、(1) すべての道路に対して、その道路を閉塞させる可能性のある沿道建物の抽出を行う。次に、各沿道建物に対して、(2) 過去の震災時の被害調査結果から推定された、建物から道路側にガレキが流出する確率と、ガレキにより前面道路が閉塞する確率に基づき、閉塞する道路を推定する。

(1) 沿道建物の抽出

本研究では、道路 St の沿道建物集合 $Bs(St)$ を道路 St の中心線から $BF(St)$ (m) 以内に存在する建物集合として定義する（式(15)）。

$$BF(St) = W(St) \cdot 0.5 + BF_0 \quad (\text{m}) \quad (15)$$

ここで、 $W(St)$ は道路 St の幅員(m)であり、 BF_0 は沿道建物のみを抽出するためのバッファ距離(m)である。ここでは、薄井・浅見の建物敷地の接道に関する研究[38]を参考に BF_0 を 4m に設定した（図 2.3.3-1）。

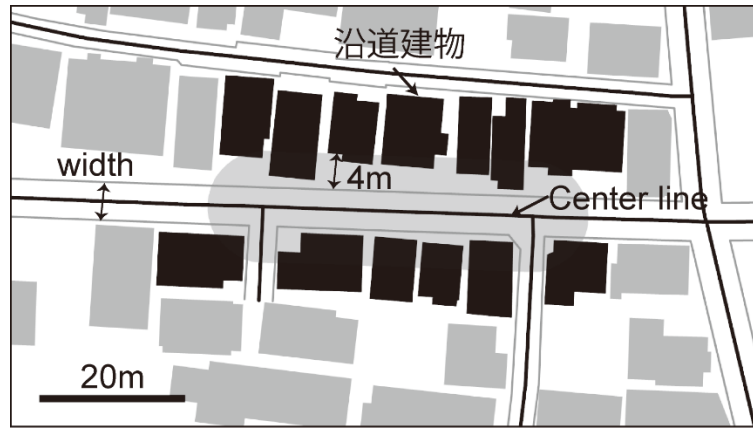


図 2.3.3-1 道路と沿道建物集合の関係

(2) 道路閉塞確率の推定

想定地震 E における道路閉塞確率 $P_{sb}(St, E)$ の推定では、まず沿道建物 b ごとに前面道路を閉塞させるだけのガレキが発生する確率 $f(St, b, E)$ の推定を行う（式(16)）[37]。次に、式(17)に基づき、沿道建物 b が倒壊しても建物 b の前面部分が通行可能である確率 $(1 - f(St, b, E))$ を掛け合わせることで道路全体が通行可能である確率を算出し、道路閉塞確率 $P_{sb}(St, E)$ の推定を行う。

$$f(St, b, E) = Dc(b, E)(1.1753Sc(b) - 0.0514) \cdot \exp\left(\frac{-W(St)}{2.58Cr(b, E)^{0.379} + 0.210Fl(b)^{2.23} + 4.90Sc(b)^{12}}\right) \quad (16)$$

$$P_{sb}(St, E) = 1 - \prod_{b \in Bs(St)} (1 - f(St, b, E)) \quad (17)$$

ここで、 $f(St, b, E)$ は沿道建物 b の前面部分が通行可能である確率であり、 $Dc(b, E)$ は建物 b の倒壊の有無（倒壊：1，非倒壊：0）を表すダミー変数、 $Sc(b)$ は建蔽率、 $Cr(b)$ は所属する町丁目内での平均全壊割合、 $Fl(b)$ は階数、 $Bs(St)$ は道路 St における沿道建物の集合である。

4. 本研究で使用するモデルと東京都での推定結果

4.1 本研究で使用するモデル

本研究では、建物倒壊シミュレーションモデルとして、「2.2 実構造・建築年代に基づく倒壊確率モデル」[29,30,34]を用いる。これにより、地表面応答シミュレーションモデルは、「1.2 地表面最大応答推定モデル」[25,26]を用いることになる。性能等価応答スペクトルモデル[32]等により、物理的な知見を取り入れることで推定精度が高くなる可能性はあるが、発展途上であり、現状の市街地分析に適用するのは困難である。また、道路閉塞は、沿道建物の倒壊状況やガレキ流出状況、道路特性が主要な説明変数であると考えられることから、「3.3 道路閉塞確率モデル」[37]を用いて分析する。

4.2 地表面応答の推定結果

250m メッシュ単位で PGV, PGA, 計測震度を推定し、空間分布として図 2.4.2-1～図 2.4.2-3 に示してある。震源に比較的近い東京都の南東部で高く、市部（西部）へ向かうほど距離による減衰効果が強くなるため、低い値を示していることがわかる。奥多摩湖や多摩湖等の湖のあるメッシュや多摩川等の河川を含むメッシュでは表層地盤による増幅効果が大きいので、ところどころに値の大きいメッシュが点在もしくは線上に分布している。震度分布（図 2.4.2-3）をみると、震度 6 強（計測震度が 6.0～6.5）となるエリアが少ないように見えるが、東京都区部の北部等では、計測震度 5.9 以上の値を示しているため、建物倒壊等を推定する上で大きな影響はない（図 2.4.2-3'）。全体としてみると、大規模な建物被害の目安[39]となる PGV が 100cm/sec 以上かつ PGA が 800cm/sec² 以上の地域は少なく、建物被害はそこまで深刻にはならないものと予想される。

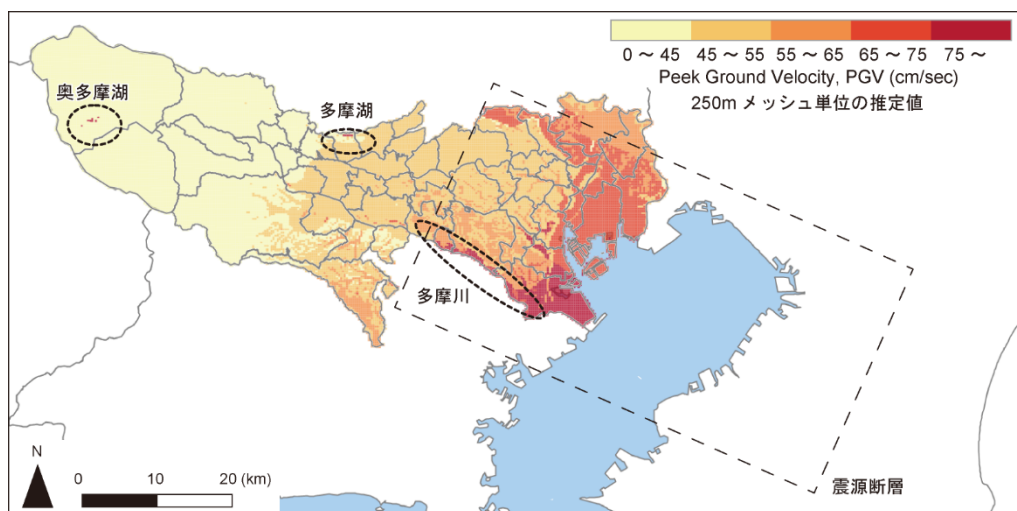


図 2.4.2-1 PGV の空間分布 (250m メッシュでの推定値)

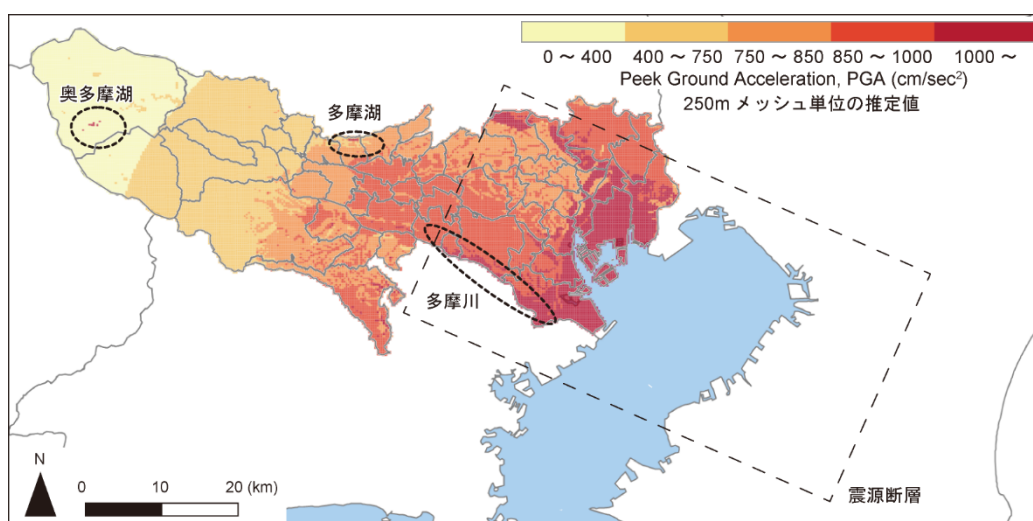


図 2.4.2-2 PGA の空間分布 (250m メッシュでの推定値)

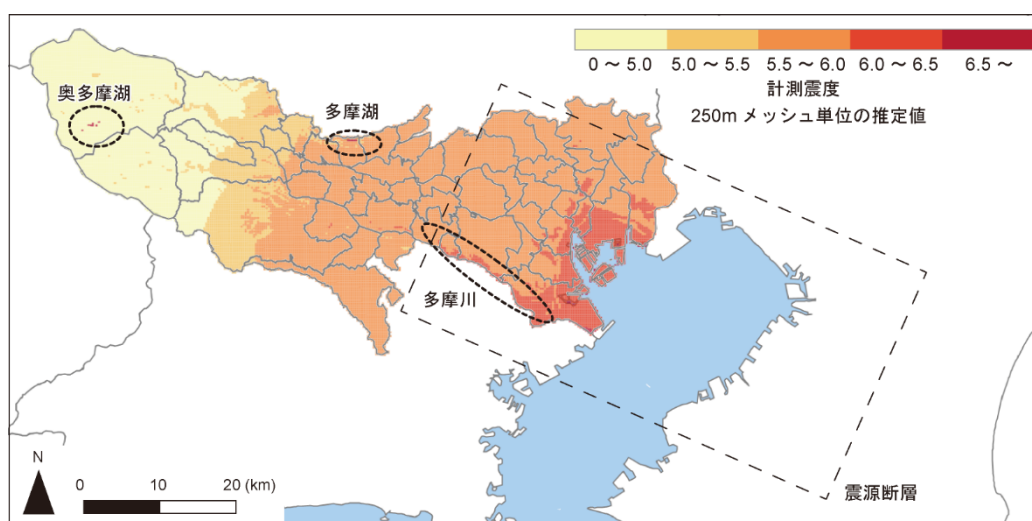


図 2.4.2-3 計測震度の空間分布 (250m メッシュでの推定値)

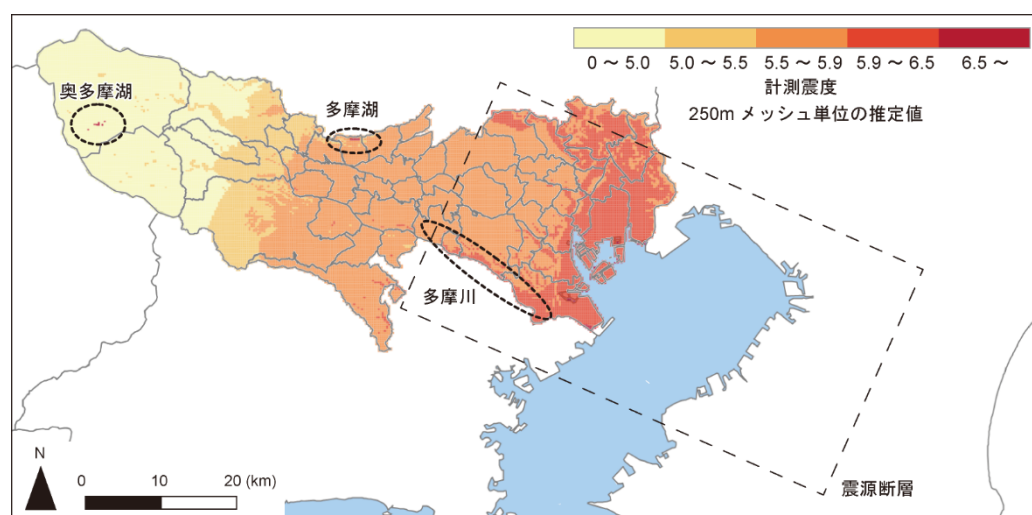


図 2.4.2-3' 計測震度の空間分布 (レンジを計測震度 5.9 以上に変更)

4.3 建物倒壊・道路閉塞の推定結果

建物倒壊と道路閉塞の推定結果の例を図 2.4.3-1 に示してある。本研究で行うシミュレーション分析は、一貫してこのような建物や道路単位のマイクロスケールな被害状況を用いて分析を行う。また、広域での特徴をわかりやすくするため、500m メッシュ内の総建物数に対する倒壊した建物の割合として、建物倒壊率を定義する。

建物倒壊確率モデルに基づく 1,000 回のモンテカルロシミュレーションにより推定した、建物倒壊率の平均値を図 2.4.3-2 に示してある。前項の PGV の値が高くないことから、木造住宅密集地域等の一部地域を除き、建物倒壊率が 10% 以下となる地域が多いことがわかる。

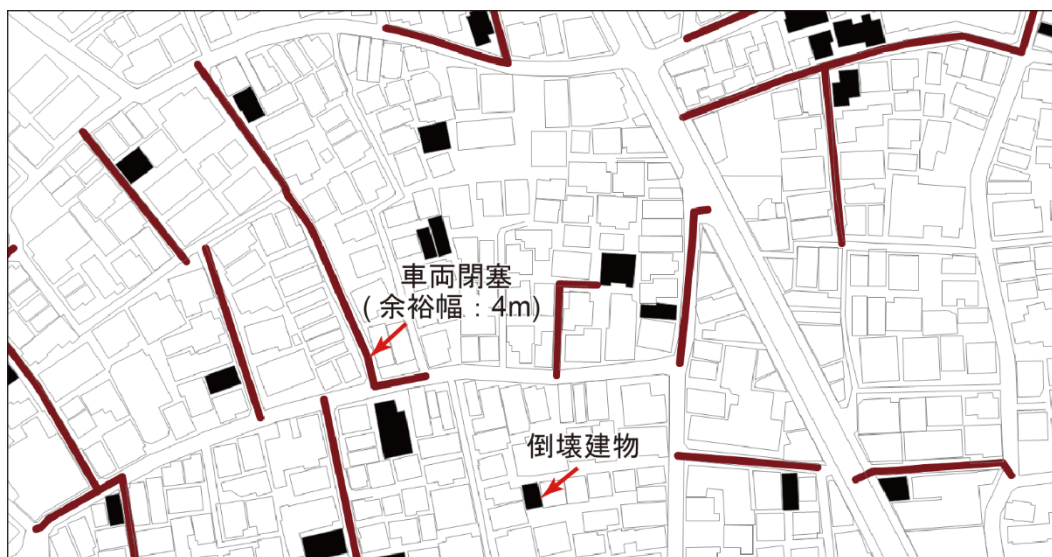


図 2.4.3-1 建物倒壊と道路閉塞の例

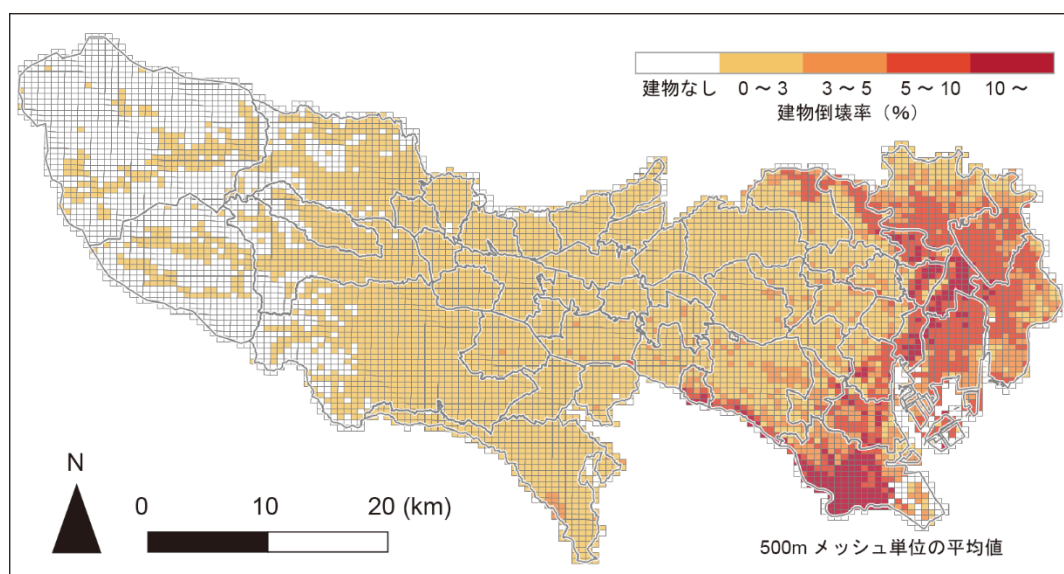


図 2.4.3-2 建物倒壊率の空間分布 (500m メッシュで集計)

同様に、500m メッシュ内の総道路数に対する道路閉塞の割合として、道路閉塞率を定義する。1,000 回のモンテカルロシミュレーションによる道路閉塞率の平均値を図 2.4.3-3、図 2.4.3-5 に示してある。ここでの余裕幅とは、通行可能領域の幅を意味し、道路幅員から道路上のガレキ幅を差し引いた値として定義する。消防車両等の大型車両が通行する際には 4m 以上の余裕幅が必要であると仮定し、余裕幅が 4m 以下となる道路を通行不能とする（車両閉塞）。地域住民等は、歩道、及び、車道のいずれも通行不可能（余裕幅 0m）であるとき完全閉塞と推定する。

車両閉塞率の空間分布（図 2.4.3-3）によると、車両閉塞率が 10%～20%程度と高くない地域が多いことが判明した。一方で、建物倒壊率と比較すると、建物倒壊率の低い 23 区西部であっても道路閉塞率が高い地域が存在している。また、建物倒壊率に対する車両閉塞率の倍率（図 2.4.3-4）を見ると、建物倒壊率の 3 倍以上となる地域も多いことがわかる。このような地域では、道路幅員が比較的狭い、もしくは、交差点間距離が長く、沿道建物数が多いものと推察されるため、耐震化と並行して道路の拡幅等も行うことでより効果的に道路閉塞率を低減できる可能性がある。一方、完全閉塞率（図 2.4.3-5）は一部の地域を除いて非常に低いこともわかる。

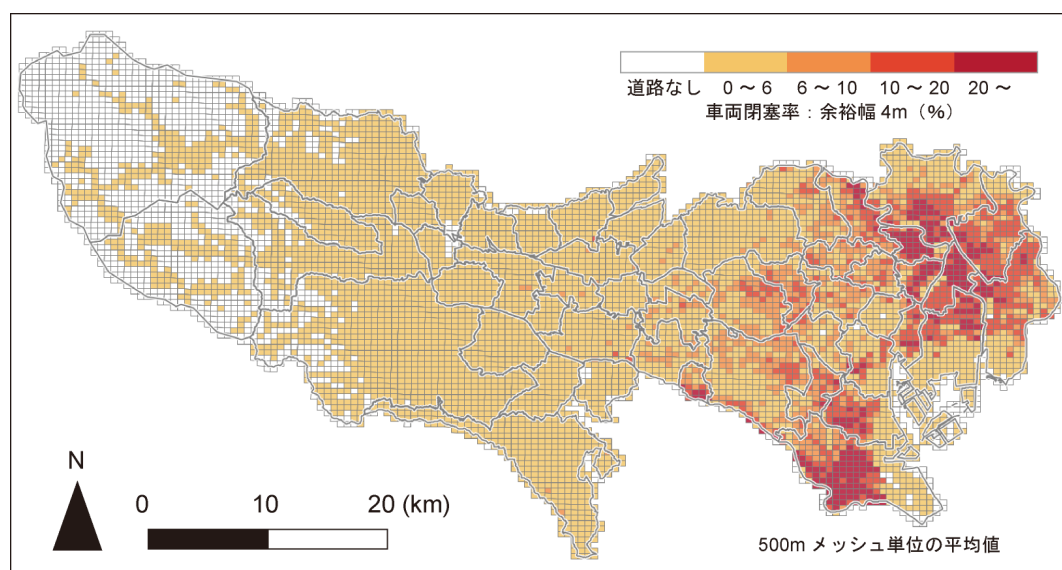


図 2.4.3-3 車両閉塞率の空間分布（500m メッシュで集計）

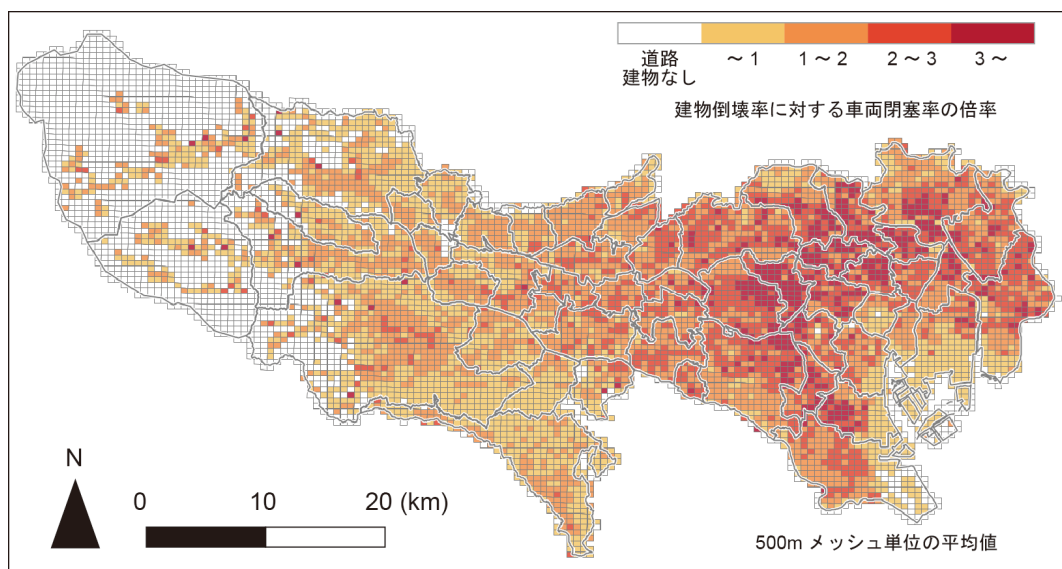


図 2.4.3-4 建物倒壊率に対する車両閉塞率の倍率

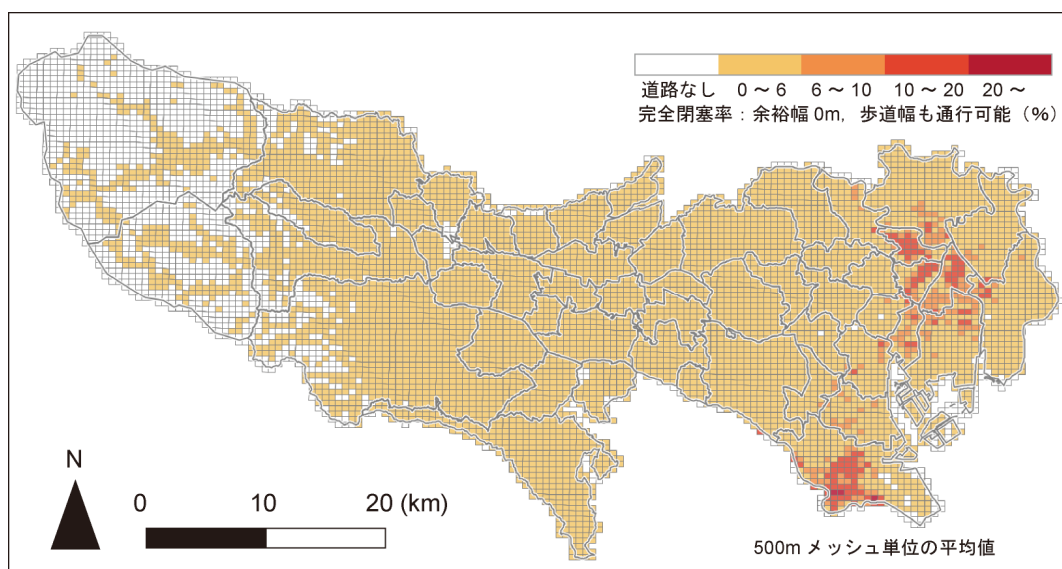


図 2.4.3-5 完全閉塞率の空間分布（500m メッシュで集計）

5. 第二章のまとめ

第二章では、道路閉塞が消防隊の移動時間に及ぼす影響を定量的に分析するために、道路閉塞状況の推定を行った。具体的には、道路閉塞状況を推定するために必要な、一連の市街地被害モデルである、表層地盤特性と震源からの距離に基づき地表面での地震応答を推定するモデルや、地震応答と耐震性能から建物倒壊を推定するモデル、沿道建物の倒壊の有無や道路幅員等により、道路閉塞を推定するモデルを整理・統合した。本研究では、現状で入手可能なデータの制約や、過去の地震で検証された各被害モデルの推定精度等を考慮して、利用するモデルの検討を行った。次に、東京湾北部地震が発生した際の市街地被害状況を東京都全域で推定し、建物倒壊率が高くない地域も含めて、道路閉塞率の高い地域が広く分布していることを示した。また、全体としてみると、道路閉塞率は、10%~20%程度の地域が多いことも判明した。

ただし、建物倒壊モデルに必要な変数である実構造や建築年代の情報は、建物データに存在していないため、町丁目単位の詳細な集計量や建物単位の防火・耐火性能の情報等に基づき推定したうえで分析を行っている。現状であっても一部の自治体では、建築確認申請のデータ等から、詳細な建物データを整備していることから、このような詳細なデータを東京都全域で整備することは今後の課題といえるであろう。また、建物倒壊モデルに関しては、性能等価応答スペクトル等の物理的な知見を取り入れたモデルが進展することで、建物倒壊現象の推定精度が向上する可能性がある。さらに、道路閉塞の推定モデルでは、建物倒壊によるガレキの影響のみを考慮しており、放置車両やブロック塀等の影響が考慮されていないため、道路閉塞被害は過小に推定される傾向にある。これらを考慮した精緻な被害モデルについては、今後の課題としたい。加えて、建物倒壊現象は、近年発生した地震においても観測されていることから、これらの地震での市街地被害モデルの検証も今後の課題である。

第三章

消火栓の断水シミュレーションモデル

1. 断水シミュレーションモデルの概要

大地震時の断水状況は、これまで各自治体が公開している被害想定等で用いる程度であったため、メッシュや市区町村単位での集計量等に基づき推定されていた[15]。しかし、このような市区町村単位等で独立に推定を行うモデル[15]では、配水管網上での連続的な断水状況を表現できない。具体的には、給水地点側の配水管が破損した場合に、それ以降の配水管へ配水できず、断水率が高くなること等を表現できない。

そこで、本章では、従来の地区単位の断水率推定モデルをレビューするとともに、新たに構築した配水管網や給水エリアを考慮した断水シミュレーションモデルについて述べ、配水管や消火栓単位で断水箇所の推定を行う。

2. 配水管の破損確率と集計的な断水率推定モデル

2.1 配水管の破損箇所数の期待値

東京都の被害想定[15]では、市区町村ごとの管種・管径別の配水管延長や地表面速度、液状化指数（PL 値）の集計量を用いて配水管の破損箇所数の期待値を推定している。一方、水道技術研究センター[40]は、液状化の情報を有していない場合も想定しており、液状化情報の代わりに表層地盤特性を用いて推定することも可能となっている。ここでは、PL 値まで考慮した精緻な推定が可能である、東京都の被害想定[15]の配水管の破損箇所数の期待値（式(18)）について述べる。

$$E_D(Pi, E) = 2.24 \times 10^{-3} \times C_{PL}(Pi) \times C_D(Pi) \times (PGV(Pi, E) - 20)^{1.51} \times L(Pi) \quad (18)$$

ここで、 $E_D(Pi, E)$ は想定地震 E における配水管 Pi の破損箇所数の期待値である。 $L(Pi)$ は配水管の延長(km)であり、 $PGV(Pi, E)$ と $C_{PL}(Pi)$ は、それぞれ配水管 Pi が存在する地盤での地表面最大速度(cm/sec)と液状化指数（PL 値）に基づく補正係数である（図 3.2.1-1）。PL 値については、ボーリングデータが入手困難であることから、本研究では、東京都の被害想定[15]で公開されている画像データをベクタデータに変換し、空間検索により 250m メッシュに結合した上で推定を行う⁶。 $C_D(Pi)$ は配水管 Pi の管種・管径による補正係数であるが、これらのデータは入手困難であることから、管種は一般的なダクタイル鉄管（耐震継手なし）と

⁶ 東京都の被害想定において、PL 値は、①0、②0<PL≤5、③5<PL の3区分のみしか公開されていない（液状化指数による補正係数には、④5<PL≤15、⑤15<PL の区分が存在する）。そこで、地盤の連続性を考慮し、②と③の境界に存在するメッシュのカテゴリを④5<PL≤15 とし、③5<PL のみと判定されたメッシュを⑤15<PL とした。

仮定し、管径は道路幅員により推定した⁷。

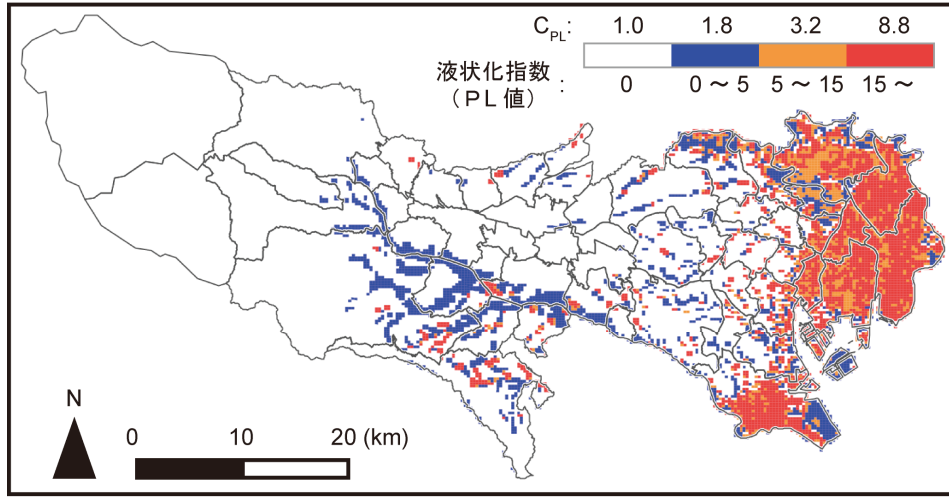


図 3.2.1-1 東京都被害想定[15]による液状化指数の推定値

2.2 集計的な断水率推定モデル

東京都の被害想定[15]では、メッシュや市区町村ごとに集計（または、推定）された配水管延長データや表層地盤データ等と配水管の破損箇所数の期待値を用いて、断水率を概算している（式(19), (20)）。しかし、実際の断水被害はメッシュや市区町村単位等で独立しておらず、給水地点と配水地点との関係性（配水管網）に依存しているものと考えられる。すなわち、この手法では、給水地点付近等に存在する配水管の破損が、遠方の地域への配水可能性に及ぼす影響を考慮しておらず、給水地点から遠い地域の断水率は過小に推定される可能性がある。

$$P_{DA}(Area, E) = \frac{\sum_{pi \in Pis(Area)} E_D(pi, E)}{\sum_{pi \in Pis(Area)} L(pi)} \quad (19)$$

$$P_{wo}(Area, E) = \frac{1}{1 + 0.307 \times P_{DA}(Area, E)^{-1.17}} \quad (20)$$

⁷ 道路幅員と管径、および、補正係数 C_D の関係は、6m 以下：75mm 以下：0.60，8m 以下：100mm～450mm：0.30，10m 以下：500mm～900mm：0.09，10m より広い：1000mm 以上：0.05 とする（道路幅員：管径：補正係数）。ただし、小林ら[24]に倣い、幅員 13m 以上では 2 本の配水管が埋蔵されているものとし、破損確率を半減する。

ここで、 $P_{wo}(Area, E)$ は、想定地震 E における地区 $Area$ の断水率であり、 $P_{DA}(Area, E)$ は地区内の平均的な配水管被害率（箇所/km）である。 $L(pi)$ は配水管の延長(km)であり、 $Pis(Area)$ は地区 $Area$ 内の配水管集合である。

3. 到達可能性解析による消火栓の断水モデル

3.1 配水管網の構造推定

水道やガスなどの埋設管は基本的に道路の下に存在している。このことを利用して、小林ら[24]は、道路ネットワークデータから配水管網を推定する方法を提案している。そこでは、DID 地区等の水道需要の多い地区では、配水管が埋設されていない立体交差道路やデータ化されていない私道等の一部を除き高い精度で推定が可能であることを示している。東京都の大部分は DID 地区であることから、本研究でも、この手法を用いて配水管網の位置を推定する（図 3.3.1-1(1)）。次に、配水管網上での連続的な断水状況を推定するために、浄水場や消火栓のポイントデータと道路ネットワークデータを結合し（図 3.3.1-1(2)，図 3.3.1-2(2)），浄水場を起点、各消火栓を終点とするように配水方向を推定する。その際、各消火栓へは、浄水場から最短経路（配水管延長が最小となる経路）で水が運ばれるものと仮定し、経路探索アルゴリズム（Dijkstra 法）を応用して配水方向を求める（図 3.3.1-1(3)，図 3.3.1-2(3)）⁸。このとき、代替路による配水可能性を考慮すると、従来モデルの推定結果と比較して、大幅な過小推定となったことから、本研究では代替路による配水可能性を考慮していない。すなわち、配水管網を Tree 構造として表現している。また、各々の浄水場を起点とするような Tree を重ね合わせることで、井桁状の冗長性を表現する。

⁸ 実際の配水管網では、水圧の変化に伴い、推定した配水方向と逆向きに配水されることも考えられる。本研究では、大規模シミュレーションを行うため、計算効率の観点から配水管網として Tree 構造を仮定し、浄水場ごとの配水距離に基づく水圧状況のみを考慮する（複数の Tree 構造の重ね合わせ）。すなわち、配水管破損に伴う水圧変化による配水方向の変化は考慮していない。

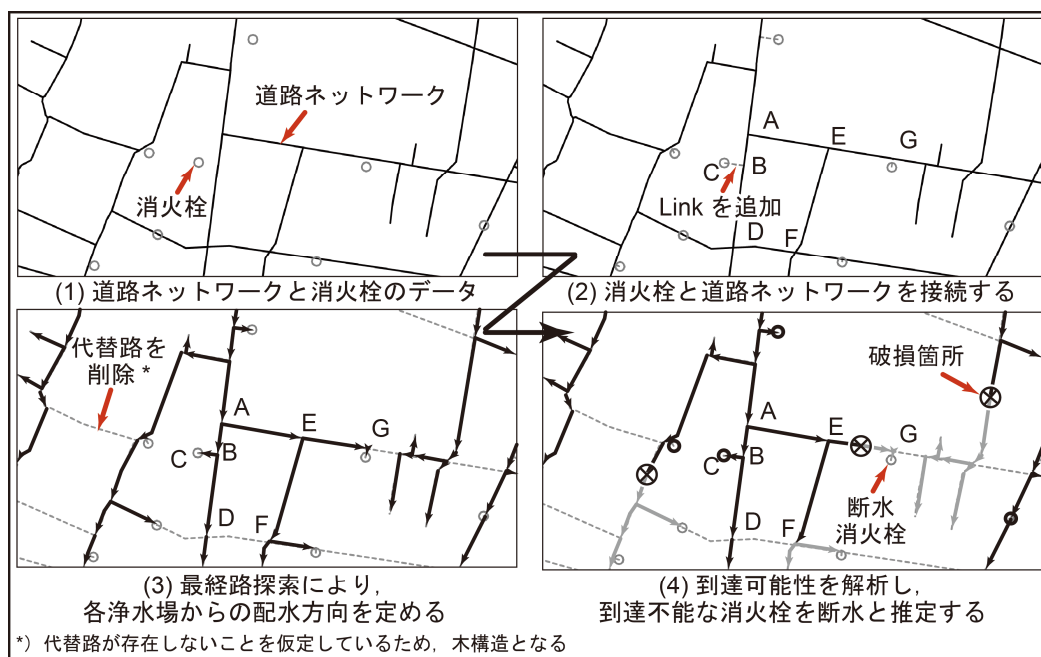


図 3.3.1-1 断水シミュレーションモデルの概要*

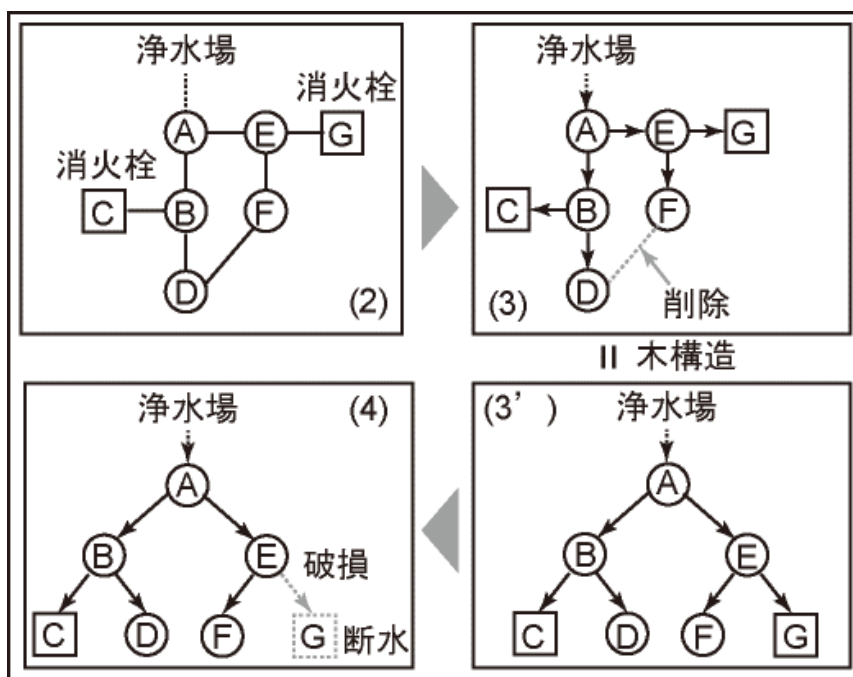


図 3.3.1-2 断水シミュレーションの模式図*

*代替路による配水可能性を考慮すると、従来モデルの推定結果と比較して大幅な過小推定となったことから、本研究では代替路による配水可能性を考慮していない。すなわち、配水管網を Tree 構造として表現している。

3.2 配水管の破損確率モデル

消火栓等の断水被害は配水管網上で連続的であるが、個々の配水管の破損の有無については、他の配水管被害に影響されない。そこで本研究では、まず、前節の配水管破損箇所数の期待値 $E_D(P_i, E)$ [15] (式(18)) を用いて配水管破損確率モデルを構築した (式(21), 式(22))。具体的には、配水管内のそれぞれの部位での破損発生確率が一様かつ部位ごとに独立であると仮定すると、想定地震 E における配水管 P_i の破損箇所数が k である確率 $P_D(P_i, k, E)$ はポアソン分布となり、 $E_D(P_i, E)$ を用いて式(21)で表現できる。すなわち、破損が発生する確率 $P_{DL}(P_i, E)$ は、式(22)となる。

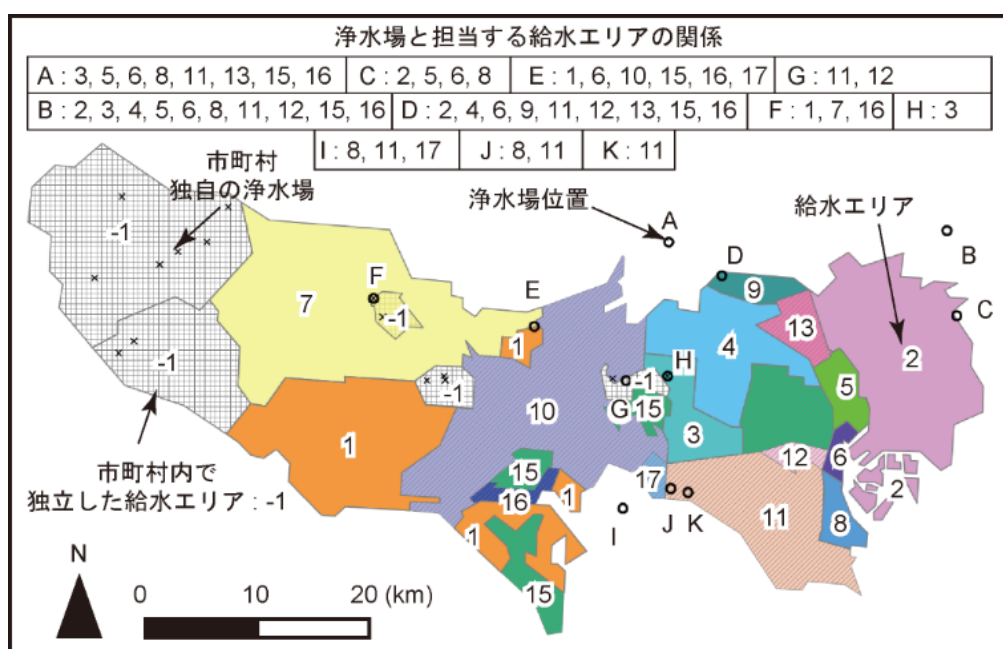
$$P_D(P_i, k, E) = \frac{(-E_D(P_i, E))^k \exp(-E_D(P_i, E))}{k!} \quad (21)$$

$$P_{DL}(P_i, E) = 1 - P_D(P_i, 0, E) = 1 - \exp(-E_D(P_i, E)) \quad (22)$$

3.3 到達可能性解析による断水した消火栓の推定

消火栓の断水の有無は、推定された破損配水管を配水不能とした場合の、浄水場から消火栓までの到達可能性に基づき推定する (図 3.3.1-1(4), 図 3.3.1-2(4))。このとき、破損箇所からの漏水や圧力損失が少なく配水可能な場合、および、破損が重大であり、破損箇所近傍の圧力低下が大きくなることで、その破損箇所の近傍に存在する消火栓に配水不可能となる場合もあるが、現時点で破損度合いを正確に推定することは困難であることから考慮していない。

さらに、東京都水道局が公開している各浄水場の担当する給水エリア [41] (図 3.3.3-1) を考慮し、浄水場ごとに配水可能な消火栓を限定する。ただし、配水管工事等の際に給水エリアが変更されることから、圧力等には余裕があるものと仮定し、緊急時には給水エリアの外周から 3km の範囲まで配水可能であるとする。また、浄水場が存在する給水エリアにも配水可能であると仮定する。さらに、奥多摩町・檜原村・昭島市・羽村市・武蔵野市は、独自の配水システムとなっていることから、各市町村内部の配水管及び給水施設のみを用いて配水するものとし、各市町村外部への配水も行わないものと仮定した。



3.4 東京都でのシミュレーション結果

断水シミュレーションは、消火栓単位のマイクロスケールの断水状況の推定結果を利用すること、配水管網上での連続的な断水状況を推定できることを考慮して、「3.到達可能性解析による消火栓の断水モデル」を用いる。

断水シミュレーションモデルに基づく 1,000 回のモンテカルロシミュレーションにより推定した断水率（市区町村内の総消火栓数に対する断水した消火栓の割合）の平均値を図 3.3.4-1 に示してある。液状化被害が予想される東京都東部や南部（図 3.2.1-1）[15]、浄水場から遠い東京都南西部で断水率が高くなり、浄水場に近い東京都市部の北部では低くなることが判明した。また、断水率が 40%前後となる地域も比較的多く、このような地域では大地震時であっても消火栓を利用できる可能性がある。さらに、檜原村や昭島市等では独立した配水システムを有しているため、配水距離も短く断水率は低い。

参考として東京都の被害想定[15]と比較する。提案した断水モデルによる断水率の方が、浄水場から遠い東京都南西部で非常に高くなっていることがわかる（図 3.3.4-2）。これは、配水管網や給水エリアを考慮したことによる影響と考えられる。また、独立した配水システムを有する地区では、配水管網による影響が小さく、従来手法と比較して大きな差異はない。すなわち、独立した配水システム等を保有し、市区町村内で完結している場合は、従来手法でも推定できる可能性があるが、広域での断水状況を推定する際に、本研究で構築した断水シミュレーションが非常に有効となることが示された。

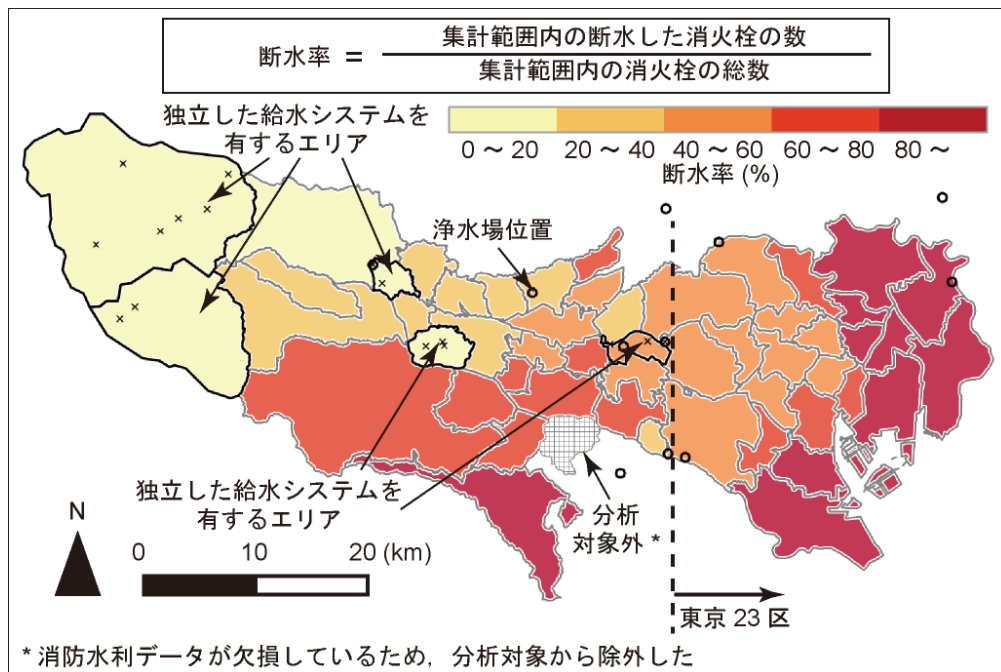


図 3.3.4-1 断水率の空間分布（市区町村で集計）

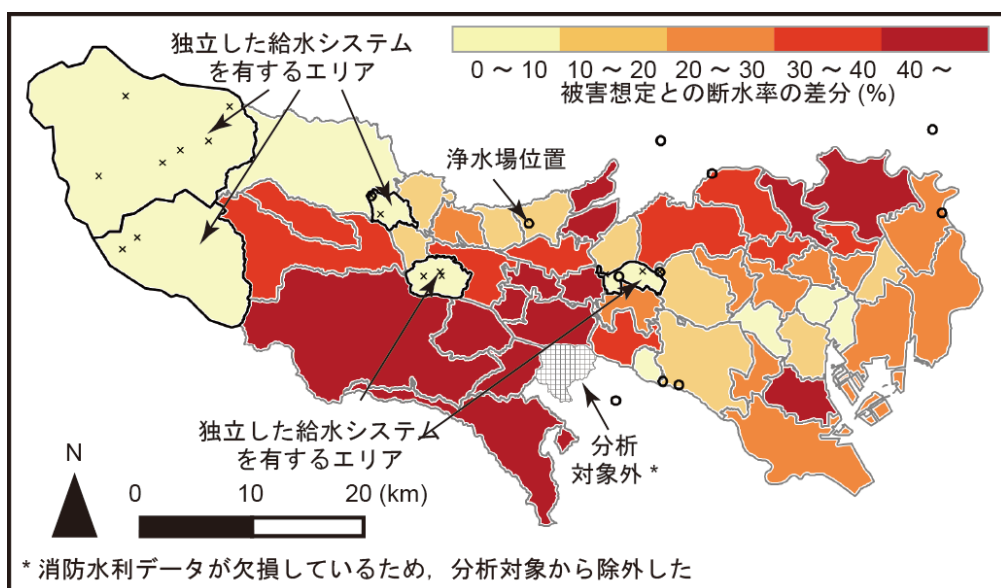


図 3.3.4-2 到達可能性解析による消火栓の断水モデルと被害想定と比較
 (到達可能性解析による消火栓の断水モデルの断水率 — 被害想定 [15] の断水率)
 (市区町村で集計)

4. 第三章のまとめ

第三章では、大地震時の消火栓の利用可能性について検討するために、消火栓の断水シミュレーションモデルの構築を行った。従来までは、市区町村単位等の集計量を用いて、断続的に断水率を推定するモデルが用いられてきた。しかし、実際の断水現象は、配水管網に強く依存するものと考えられる。すなわち、給水地点付近での配水管破損が遠方に存在する配水管への配水可能性に大きく影響するため、従来のモデルでは、給水地点から遠ざかるにつれて、過小に推定される傾向にあった。

そこで本研究は、配水管網上での連続的な断水現象を表現可能な、断水シミュレーションモデルの構築を行った。具体的には、配水管の特微量や地盤特性等に基づく配水管の破損確率モデルと、破損した配水管を配水不能とした際の各消火栓までの到達可能性解析に基づく、断水シミュレーションモデルの構築を行った。

断水シミュレーションの結果に基づくと、液状化被害が予想される東京都東部や南部だけでなく、給水地点から遠い東京都南西部でも断水率が高くなることが判明した。また、既存手法と比較した場合に、給水地点にから遠ざかるにつれて高く推定されることが確認できた。さらに、独立した水道設備を有している一部の地域では、従来手法と比較しても大きな差異はないことも判明した。この結果は、広域での断水状況を推定する場合には、配水管網の影響は無視できない要因となるため、本研究の断水シミュレーションモデルが有効となることを示唆している。

ただし、本研究で構築した断水シミュレーションモデルでは、代替路による配水可能性は考慮していない。すなわち、配水管網の構造を各々の給水地点を起点とする Tree 構造の重ね合わせとして表現している。これは、代替路を考慮した場合に、従来手法と比較して大幅な過小推定となったためであるが、配水管被害やそれに伴う圧力損失の度合いが推定可能となれば、代替路を考慮した上で、より精緻な分析を行える可能性がある。また、現時点で破損度合いを正確に推定することは困難であることから、破損箇所からの漏水や圧力損失が少なく配水可能な場合、および、破損が重大であり、破損箇所近傍の圧力が大きく低下することにより、破損箇所近傍に存在する消火栓に配水不可能となる場合は考慮していない。破損度合い等を考慮した精緻なモデル化は今後の課題である。

第四章

建物出火・市街地延焼モデル

1. 建物出火・市街地延焼モデルの概要

市街地延焼被害の推定モデルは、延焼シミュレーションモデル[42,44,45]と延焼クラスタモデル[47]に大別される。

延焼シミュレーションモデルでは、まず、出火シミュレーション[42,43]等により、出火する建物を推定する。次に、出火建物を起点として、延焼速度式[42,44]等により時刻ごとの延焼被害を記述する。延焼シミュレーションでは、風や時間経過に伴う炎上領域の拡大による加速効果等を考慮するため、一般に計算負荷が高いとされていた。そのため、従来までは、市街地の延焼危険性を推定するために、数棟の建物を出火建物としてサンプリングして延焼シミュレーションを実行していた。しかし、延焼被害は、出火した建物の防火・耐火性能や近傍建物との関係性に大きく依存するため、このような方法では、市街地全体の安全性を正確に評価することが困難となる。

一方、延焼クラスタモデルでは、延焼限界距離[46,47]を用いて、最終的に焼失してしまうであろう建物群（延焼クラスタ）を推定する。この手法では、時系列での推定を必要としないことや、地震規模等に依らず建物の防火・耐火性能等のみで延焼クラスタが一意に確定するため、計算負荷は比較的低い。また、クラスタ内の建物の出火確率[42,43]を用いれば、市街地内での焼失棟数の期待値等を推定することも可能である。しかし、延焼クラスタモデルは、最終的な焼失被害のみを推定する手法であるため、消防活動戦略を検討する上で重要な時刻と延焼被害との関係性が推定できないという問題がある。

2. 用途別出火確率モデル

大地震時の建物からの出火現象を記述するモデルには、建物用途ごとの電気ストーブやガスコンロ等の火気器具等の保有率や、季節・時間帯別の各器具の使用率、震度別等に推定された各器具からの出火確率等に基づき、建物単位で出火確率を推定するモデル[42,43]がある。建物用途は全部で19種類が想定されており、土地利用現況調査に基づく建物データの属性情報と異なる場合もあるため、双方を照らし合わせる必要がある⁹。なお、最終的な出火建物の推定には、この出火確率と用途別の初期消火確率を考慮する必要がある。

⁹ 例えば、土地利用現況調査での建物用途区分と消防法施行令上の用途区分の対応は、以下のように設定した（土地利用現況⇒消防法区分）。医療施設⇒診療所、教育施設⇒小学校、商業施設⇒飲食店、公衆浴場⇒公衆浴場、宿泊施設⇒旅館・ホテル、遊興施設⇒キャバレー、興行施設⇒映画館、専用工場・住居併用工場・倉庫施設⇒工場・作業所、独立住宅・住商併用建物⇒住宅、集合住宅⇒共同住宅、官公庁施設・文化施設・宗教施設・厚生施設・事務所建築物⇒事務所、上記以外⇒その他。

3. 延焼シミュレーションモデル

3.1 マイクロスケール延焼シミュレーションの概要

延焼シミュレーションモデルは、過去の市街地火災のデータに基づく経験的なモデル[42,44]と、物理的な知見に基づく理論的なモデル[45]の2種類が考案されている。例えば物理的な知見に基づくモデルとして、樋本・田中のモデル[45]がある。樋本・田中は、経験的なモデルが過去の市街地火災に大きく依存している可能性を指摘し、物理的な知見に基づく汎用的な延焼シミュレーションモデルを提案している。このモデルでは、火の粉の飛散による延焼等も考慮した精緻なモデルとなっている。しかし、被害推定のために必要となる説明変数は多く、広域の市街地に適用することは難しいため、ここでは、過去の市街地火災のデータに基づく経験的なモデルについて述べる。

3.2 防火・耐火性能に基づく延焼速度式

延焼速度式[42,44]は、過去の大地震時における市街地火災の報告書や、用途別の開口部の状況調査等に基づき構築されている。延焼速度式[42,44]は、大きく棟内の延焼速度式と隣棟間の延焼速度式の2つの速度式から構成される。棟内延焼速度は主に、建物の1辺の長さ（建築面積の平方根で近似する場合が多い）と、地表面最大加速度（PGA）から推定した建物の損傷具合から推定され、隣棟間延焼速度式は、延焼元・延焼先建物双方の防火・耐火性能や、損傷具合、隣棟間距離、風向・風速等から推定される。延焼速度式による着火の判定は、着火するまでに要する時間と、延焼元の建物の火災継続時間（可燃物の総量等）や防火壁の影響による鎮火時間との関係から確定的（非確率的）に推定される。また、それぞれの防火・耐火性能ごとに異なる推定式が用意されているため、代表的な延焼速度の推定式を以下に抜粋しておく（棟内延焼速度式（式(23)～(29)）、隣棟間延焼速度式（式(30)））。

$$V_{sF1}(B, E) = \frac{6.33L(B)}{1.17L(B) + (L(B) - 5.0)f(B, E) - 5.0} \quad (23)$$

$$V_{sF2}(B, E) = \frac{13.3L(B)}{1.35L(B) + (L(B) - 5.0)f(B, E) - 5.0} \quad (24)$$

$$V_{sF3}(B, E) = \frac{23.8L(B)}{1.63L(B) + (L(B) - 5.0)f(B, E) - 5.0} \quad (25)$$

$$V_{F1}(B, E) = \frac{5.54L(B)}{1.18L(B) + (L(B) - 5.0)f(B, E) - 5.0} \quad (26)$$

$$V_{F2}(B, E) = \frac{14.2L(B)}{1.47L(B) + (L(B) - 5.0)f(B, E) - 5.0} \quad (27)$$

$$V_{F3}(B, E) = \frac{17.3L(B)}{1.58L(B) + (L(B) - 5.0)f(B, E) - 5.0} \quad (28)$$

$$f(B, E) = 0.00034 \cdot PGA(B, E) - 0.054 \quad (29)$$

ここで、 $V_{sF1}(B, E)$, $V_{sF2}(B, E)$, $V_{sF3}(B, E)$, $V_{F1}(B, E)$, $V_{F2}(B, E)$, $V_{F3}(B, E)$ は、それぞれ想定地震 E における準耐火造建物レベル 1～3, 耐火造建物レベル 1～3 の棟内延焼速度式(m/h)であり、 $L(B)$ は建物の 1 辺の距離(m), $f(B, E)$ は区画損傷率, $PGA(B, E)$ は地表面最大加速度(cm/sec²)である。レベルは、用途ごとの延焼危険性を表しており、レベル 1 は旅館ホテルや病院等、レベル 2 は飲食店や事務所等、レベル 3 は倉庫や工場を指す。また、隣棟間の延焼速度式は、建物 $B1$ から建物 $B2$ へ着火するまでの時間 $T(B1, B2, E, W)$ で推定されており、以下のよう表される。

$$T(B1, B2, E, W) = \frac{(a(B1, B2) \cdot PGA(B1, E) + b(B1, B2)) \exp\{(c(B1, B2) \cdot PGA(B1, E) + d(B1, B2)) \cdot D(B1, B2)\}}{0.048 \cdot W + 0.822} \quad (30)$$

ここで、 $D(B1, B2)$ は隣棟間距離(m), W は風速(m/sec)である。 $a \sim d$ は、延焼元建物 $B1$ と延焼先建物 $B2$ の防火・耐火性能や階数、用途の組合せごとに推定されている。これらの式に基づくと、例えば、風速 W が 8m/sec, 地表面最大加速度 $PGA(B1, E)$ が 800cm/sec², 延焼元建物 $B1$ が一般的な用途であるレベル 2 の準耐火造建物であり、延焼先建物 $B2$ が木造建物の場合 ($a = -0.0015, b = 6.3, c = 0.00003, d = 0.53$), 隣棟間距離 $D(B1, B2)$ が 5m の場合、着火時間は、67.49 分となり、自然に鎮火する（延焼前に可燃物が尽きる）可能性が高いこと等がわかる。

3.3 炎上領域の拡大に伴う延焼速度の加速効果

炎上領域の拡大に伴い、延焼先建物は周辺の複数の延焼元建物から同時に輻射熱等を受け取るため、延焼速度は加速する（着火までの時間が早くなる）。この効果を考慮するため、地域単位の延焼速度をマクロな立場から記述しているマクロ延焼速度式を用いて延焼速度式を補正する[42,44]。具体的には、想定地震 E における、建物 B の所属する地域 A 内の、

ある時刻 t におけるマクロ延焼速度式 $V_m(A, t, E, W)$ (式(31), 式(32)) と, マクロ延焼速度の初期速度 $V_0(A, E, W)$ から, 式(33)により補正係数 $f(A, t, E, W)$ を求め, 建物 B のミクロ延焼速度式に乗算することで補正する.

$$V_m(A, t, E, W) = \frac{V_f(A, E, W)}{1 + (1.3 - 0.3 \exp(-0.3t)) \left(\frac{V_f(A, E, W)}{V_0(A, E, W)} - 1 \right) \exp\left(\frac{-0.5V_f(A, E, W)}{V_f(A, E, W) - V_0(A, E, W)} t\right)} \quad (31)$$

$$V_f(A, E, W) = \frac{V_U(A, E, W) + V_I(A, E, W) \exp(-50(k(A, E, W) - 0.14))}{1 + \exp(-50(k(A, E, W) - 0.14))} \quad (32)$$

$$f(A, t, E, W) = \frac{V_m(A, t, E, W)}{V_0(A, E, W)} \quad (33)$$

ここで, $V_0(A, E, W)$, $V_f(A, E, W)$ は, それぞれ初期延焼速度と最終延焼速度であり, t は出火からの経過時間(hour)である. また, $V_U(A, E, W)$, $V_I(A, E, W)$ は, それぞれ気流温度の影響による延焼速度, 輻射熱の影響による延焼速度である. $k(A, E, W)$ は地域内の耐火造建物の割合や建蔽率等から推定される, 延焼速度の大幅な増加が発生するかを決定する係数である.

4. 延焼クラスタモデル

4.1 延焼クラスタモデルの概要

延焼クラスタモデル[47]では、延焼限界距離を用いて、最終的に延焼してしまうであろう建物集合（延焼クラスタ）を推定する。また、延焼被害の推定を行う際には、同一クラスタとなる建物集合と各建物の出火確率から最終的な焼失棟数の期待値等を算出する。

延焼クラスタを推定するためには、対象範囲内のすべての建物について、延焼限界距離の半分のバッファを発生させ、それらが重なる建物を抽出すればよい。これは、2 棟の建物対を考えた場合に、その 2 棟の延焼限界距離の平均値を用いて延焼クラスタを推定していることに相当する。すなわち、延焼の異方性情報が欠落する。また、従来の延焼限界距離[46]では、風向・風速を考慮できないなどの問題点があったが、これらを考慮可能な延焼限界距離も考案されている[47]。しかし、風速等を考慮した延焼クラスタを構築するためには、計算負荷の大きい空間検索と可視判定を実行する必要があることから、頻繁に風速等を変更する場合は、マイクロスケールの延焼シミュレーションによる推定よりも計算負荷が高くなる可能性が高い。さらに、最終的な焼失被害のみを推定する関係上、時系列での延焼推定も不可能となる。

4.2 延焼限界距離の概要

延焼限界距離には複数の種類があるが、ここでは最も代表的な延焼限界距離[46]についてレビューする。延焼限界距離は、もともと単体の建物による火災を前提として定式化された距離であるため、複数の建物に関係する火災を分析する際には注意を要する。加藤ら[47]は、延焼限界距離を 1.5 倍した値を用いて延焼クラスタを推定することで、この問題の回避を試みている。しかし、延焼クラスタモデルによる延焼被害の推定結果は、この延焼限界距離の推定結果に大きく依存しており、すべての建物に対して一律に 1.5 倍することについては議論の余地がある。延焼限界距離[46]は、以下の式で推定されており、説明変数は建物の 1 辺の長さや防火・耐火性能のみとするシンプルなモデルである。（式(34)～(37)）。

$$D_W(B) = 12 \left(\frac{a(B)}{10} \right)^{0.442} = 4.32a(B)^{0.442} \quad (34)$$

$$D_{fW}(B) = 6 \left(\frac{a(B)}{10} \right)^{0.322} = 2.86a(B)^{0.322} \quad (35)$$

$$D_{sF}(B) = 3 \left(\frac{a(B)}{10} \right)^{0.181} = 1.98a(B)^{0.181} \quad (36)$$

$$D_F(B) = 0 \quad (37)$$

ここで、 $D_W(B)$, $D_{FW}(B)$, $D_{sF}(B)$, $D_F(B)$ は、それぞれ建物 B が裸木造, 防火木造, 準耐火造, 耐火造である場合の延焼限界距離(m)であり, $a(B)$ は建物 B の 1 辺の長さ(m)である.

5. 大規模延焼シミュレーションの実現と延焼危険性指標の提案

5.1 大規模延焼シミュレーションモデルの必要性

広域かつマイクロスケールでの延焼シミュレーションが困難であったことから、延焼クラスタモデルが提案された。しかし、延焼クラスタモデル[46,47]では、計算負荷の観点から防火・耐火性能と建物の1辺の長さのみで市街地延焼を説明しており、風向や風速、想定地震 E による建物の損傷具合等を考慮できない問題や、延焼元・延焼先を区別する情報が欠落し、延焼の異方性が表現できない問題がある。例えば、延焼クラスタモデルでは、木造建物から耐火造建物へは着火しやすく、耐火造建物から木造建物へは着火しにくいことを表現できない。さらに、延焼クラスタモデルは、最終的な被害を推定する目的で作成されたモデルであり、時系列で延焼被害を推定することができない。そのため、延焼クラスタを用いて、出場時刻や移動時間と消火可能性の関係性等を分析し、大地震時の消防活動戦略を検討することは困難である。

これに対し、東京消防庁[5]の延焼危険度では、東京都全域を対象とする延焼シミュレーションを行っている。計算負荷を低減するために、250mメッシュを9つに分割し、それぞれの中心付近に存在する木造・防火造建物から出火した場合の焼失被害をもとに、市街地の延焼危険性を推定している。しかし、6時間後までの延焼シミュレーション結果に基づき分析していることや、少数の建物からの延焼被害の推定結果のみを利用していること、建物単位での延焼危険性が把握できないこと等の限界がある。また、延焼危険度には、加害（自らの火災が延焼する）・被害（もらい火で焼失する）の区別がない。

以上の問題点を克服し、大地震時の消防活動戦略を検討するためには、計算アルゴリズムの改良等により、大規模かつマイクロスケールの延焼シミュレーションを実現することが必要である。さらに、大規模延焼シミュレーションの結果に基づき、建物単位での延焼の加害性指標や、延焼阻止可能である限界の到着時間といった新たな危険性指標を構築することも重要となる。

5.2 大規模延焼シミュレーションモデル

本研究で構築した大規模延焼シミュレーションモデルは、(1)各建物が延焼した際に、直接延焼する可能性のある建物群（隣棟）の推定モデルと、(2)延焼する可能性のある建物のうち、どの建物へいつ延焼するか（延焼しない場合も含む）を推定する延焼速度式で構成される。

(1) 隣棟の抽出

まず、直接延焼する可能性のある建物群（隣棟）を、延焼限界距離[46]と空間的な近傍探索および可視判定の手法を用いて抽出する。延焼過程は、延焼元の建物、延焼先の建物双方の防火・耐火性能に依存するため、建物間を結んだ延焼経路のネットワークは有向となる（図 4.5.2-1）。これにより、「木造系建物から耐火系建物へは延焼しやすいが、耐火系建物から木造系建物へは延焼しにくい」といった延焼の異方性を表現することが可能である。

次に、延焼限界距離以内に存在する建物であっても、他の建物に遮られ（不可視となっており）、延焼元建物から直接受熱されない建物は、隣棟から除外する。ただし、広域で厳密な可視判定を行うことが困難であることから、加藤ら[47]に倣い、2 建物間の最短経路、及び、重心間経路の両方が他の建物に遮られている場合に、隣棟から除外する。さらに、延焼限界距離は単体の建物からの出火を想定した指標であり、複数棟からの受熱や風向・風速による延焼限界距離の変化が考慮されていないことから、同じく加藤ら[47]に倣い、延焼限界距離を 1.5 倍した値を用いて隣棟の推定を行う。

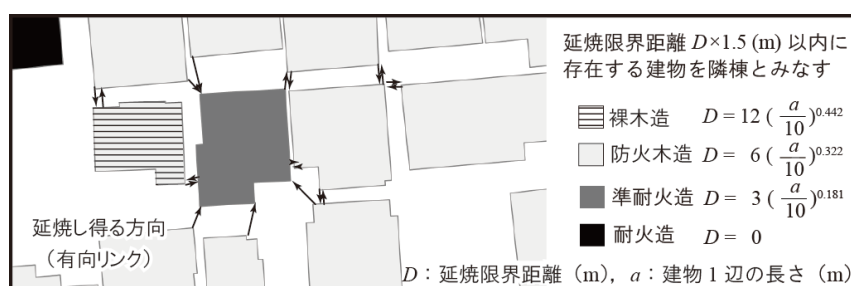


図 4.5.2-1 延焼限界距離による隣棟関係の記述例

(2) 延焼の有無の判定

次に、延焼速度式[42,44]を用いて延焼の判定を行う。これにより、延焼限界距離以内に存在する建物であっても、風向等の影響により隣棟に延焼しない場合を表現する。すなわち、延焼クラスモデルとは異なり、延焼限界距離を 1.5 倍したことにより延焼被害が過大に推定されることはない。一方、延焼限界距離が短すぎることにより、延焼被害が過小推定となる可能性は残るが、そもそも隣棟には、可視範囲という非常に強い（建物を飛び越えて延焼

しない制約)があることと、延焼限界距離の値(例えば、延焼限界距離の比較的短い小規模防火木造(25m²)の場合であっても、延焼限界距離4.8mを1.5倍すると7.2mとなること)を考慮すると、実用上は大きな問題とならないものと考えられる。ただし、倒壊建物(層崩壊建物)の延焼速度については、層崩壊する建物の空間分布に依存し、一つの出火建物について多くのモンテカルロシミュレーションが必要となるため、現時点での適用は難しい。そこで、分析を容易にするため、建物はすべて層崩壊していない状況を想定する。この想定により、延焼被害は過大推定となる傾向にあるため、最悪の場合の焼失被害を推定していると思なすことができる。

5.3 最短経路探索アルゴリズムに基づく 大規模延焼シミュレーションの実現

従来の延焼シミュレーションでは、市街地延焼が延焼速度として定式化されていることや実装の容易さから、一定時間ごとに火面を進行させていくような計算方法(数値積分により延焼距離を近似する方法)が多かった(図4.5.3-1)。この方法では、時間幅のとり方に推定精度が依存し、精度よく推定するためには膨大な計算時間がかかるという問題があった。そのため、特に、東京都全域等の大規模な延焼被害を推定する際には、延焼クラスモデルを用いて最終的な被害のみを簡易的に推定する[15]、もしくは、数棟の建物をサンプリングした上で延焼シミュレーションを実行し、延焼被害を近似的に推定するしかなかった[5]。

しかし、延焼シミュレーションによる延焼被害の推定問題は、広域避難シミュレーション等で用いられている、道路ネットワークから最短避難経路を導出する問題と本質的には等価である。具体的には、任意の延焼元建物 A 、延焼先建物 B の組に対して、建物 A の棟内延焼速度式や建物 AB 間の距離、隣棟間延焼速度、マクロ式による補正係数(出火からの時刻による加速効果)を用いて、建物 A から建物 B までの着火時間を推定することが可能である¹⁰。そして、出火建物を *origin* として、この着火時間を *cost* とする隣棟ネットワークから、最短着火時刻となる経路を算出することで延焼シミュレーション結果が得られる。これにより、時間幅の粒度等の本質的でないパラメータが消去され、理論上の推定精度は向上する。さらに、最短経路探索問題では、データ構造の工夫や、並列計算が比較的容易であることから、大幅な計算時間の短縮が可能となる。ただし、用途別の火災継続時間や防火壁の影響から、着火前に自然鎮火することもあるため、経路探索時には注意が必要である。

¹⁰ 延焼速度が経過時間に対して敏感な場合には、従来手法のように数値積分を行う必要がある。しかし、延焼速度の加速効果における経過時間の単位は hour であるため、隣棟間の延焼が開始してから終了するまでの加速効果は無視できる。実際、延焼速度式を提案している火災予防審議会[42,44]においても、この仮定のもとでマイクロスケールの延焼速度式が構築されている。

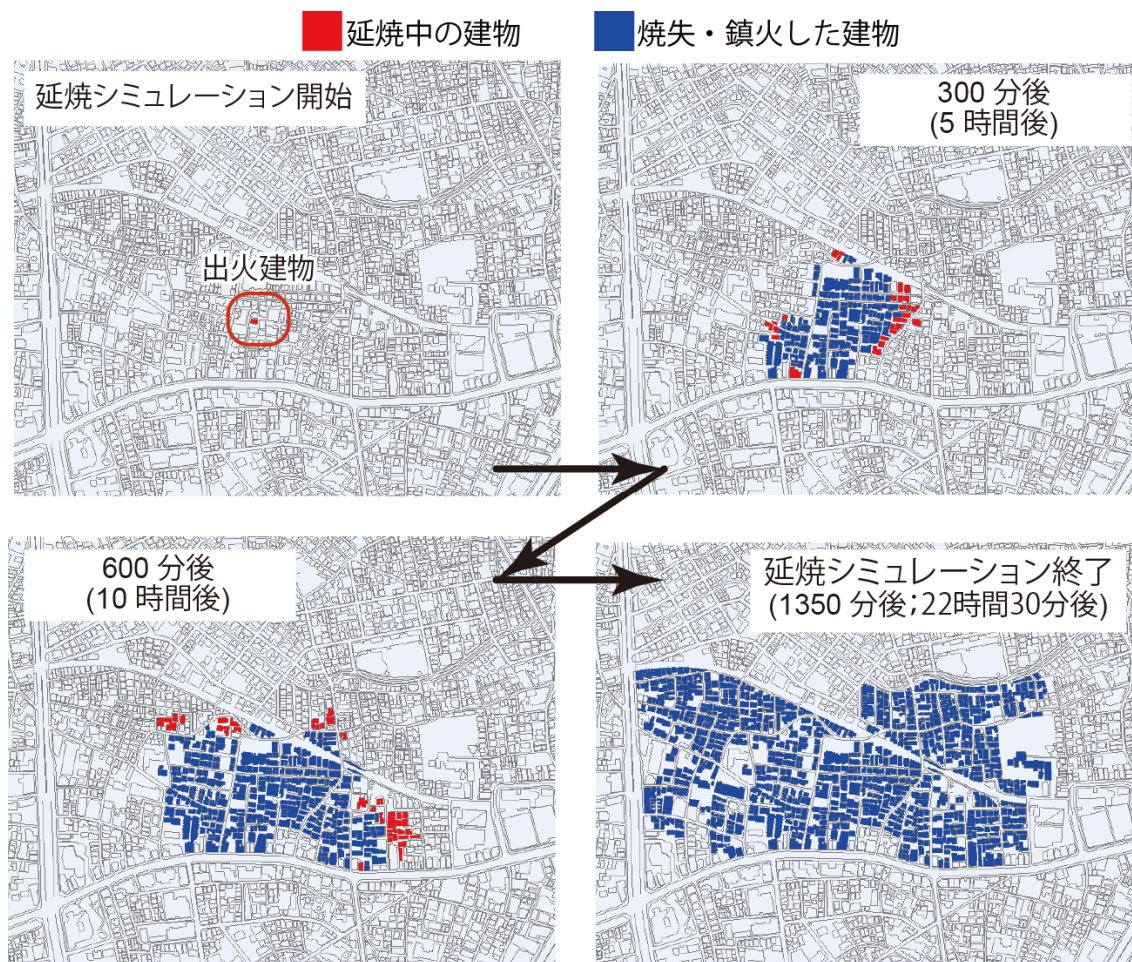


図 4.5.3-1 延焼シミュレーションのイメージ

6. 建物単位の延焼危険性指標の提案

6.1 延焼ポテンシャル

市街地における延焼は、個々の建物の防火・耐火性能や、隣棟間距離等の市街地特性が複雑に絡み合う現象である。特に、出火した建物の防火・耐火性能や、延焼の初期段階における周辺建物への延焼拡大の有無は、その後の延焼被害に大きく影響する。そのため、メッシュや町丁目単位の平均的な延焼危険性指標では、火災本来の延焼危険性を正確に評価できない可能性もある。特に、発災直後において重要な役割を担う消防活動戦略を検討する際には、上記の理由から建物単位での延焼危険性の把握が必要となる。そこで本研究では、建物単位のマイクロスケールの延焼危険性指標として、延焼ポテンシャルを提案する。

延焼ポテンシャルを「あるひとつの建物 B_i が出火し、放任火災となった際の最終的な焼失棟数」として定義する¹¹ (式(38))。すなわち、想定地震 E と風 W における建物 B_i の延焼ポテンシャル $P_{FS}(i, E, W)$ は、ある建物 B_i からの延焼シミュレーションを、延焼によって着火したすべての建物が自然鎮火、または、完全焼失するまで行うことにより推定できる。具体的には、終了時の焼失棟数がそのまま建物 B_i の延焼ポテンシャルとなる (図 4.6.1-1)。

本来、延焼危険性指標を提案する際には、焼失棟数のみでなく、人的被害等も考慮すべきであると考えられる。しかし、人的被害を評価するためには、避難シミュレーション等を用いて、焼失した建物との関係性を分析する必要がある。現時点で精緻な分析を行うことは困難である。本研究では、焼失棟数が人的被害に大きく影響すると考えられることから、焼失棟数を用いて延焼危険性を定義している。人的被害等を考慮した延焼危険性指標の提案は今後の課題である。

$$P_{FS}(i, E, W) = \sum_{j \in BS} \delta(i, j, E, W) \quad (38)$$

ここで $\delta(i, j, E, W)$ は、地震 E と風 W において建物 B_i から建物 B_j まで延焼する場合は 1、延焼しない場合は 0 を取る変数であり、 BS は対象とする地域内の全ての建物集合である。

¹¹ M7.3 規模の地震であれば、出火件数は平均 700 件 (全ての建物の 0.02%) 程度であることから、出火建物の近傍で、更に出火する可能性は低いと考えられる。そのため、延焼ポテンシャルを、近傍から複数出火しない場合の延焼危険性指標として定義している。近傍から複数出火する可能性がある場合における、延焼ポテンシャルの有効性は、第六章で議論する。

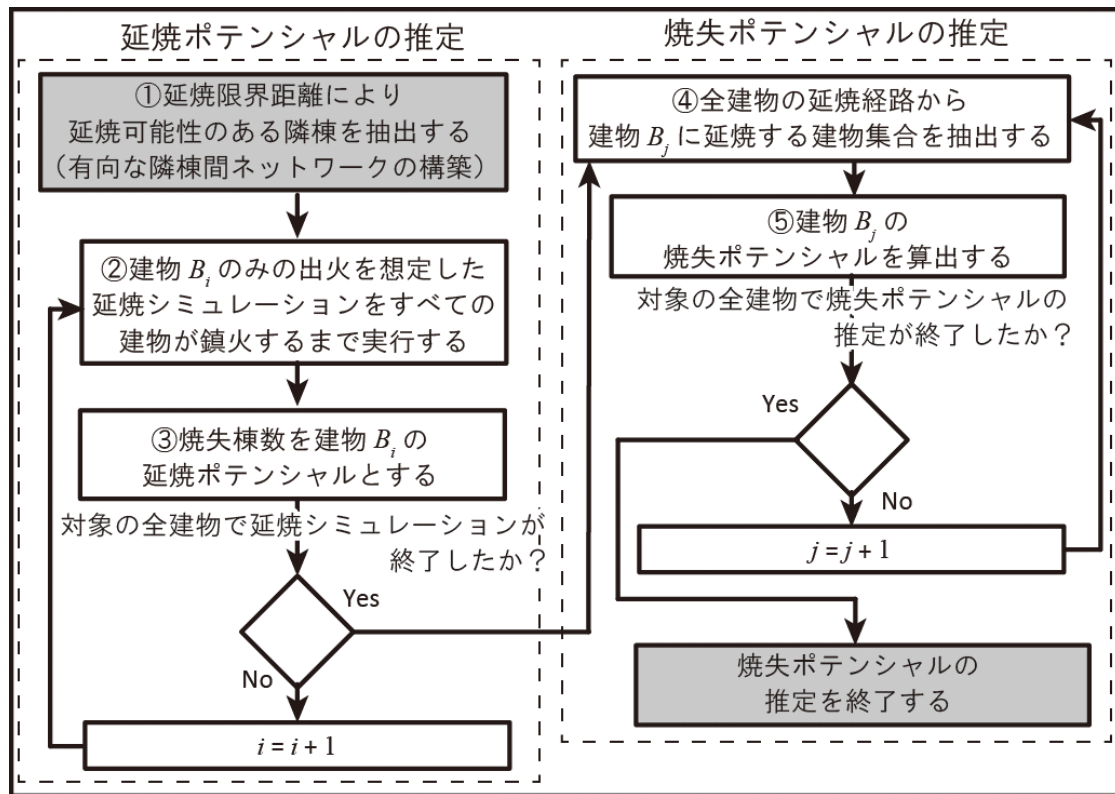


図 4.6.1-1 延焼ポテンシャルと焼失ポテンシャルの推定手順

6.2 焼失ポテンシャル

優先的に整備を行うべき建物・地域の抽出や、避難場所や重要施設の安全性評価等のための指標として、地震 E と風 W における建物 B_j の焼失ポテンシャル $P_{Bo}(j, E, W)$ を式(39)で定義する。焼失ポテンシャルとは、周囲の建物からの延焼も考慮した自らの焼失確率である。

$$P_{Bo}(j, E, W) = 1 - \prod_{i \in BS} (1 - q(i, E) \cdot \delta(i, j, E, W)) \quad (39)$$

ここで、 $q(i, E)$ は出火確率モデルにより推定した建物 B_i の出火確率である。焼失ポテンシャルを推定するには、最終的にある建物 B_j へ着火する可能性のある建物集合を抽出する必要がある。本研究では、延焼ポテンシャル計算時に既に $\delta(i, j, E, W)$ が推定されているため、この集合 ($\delta(i, j, E, W)$ の第 j 列が 1 の建物集合) は既知である。つまり、焼失ポテンシャルの推定するために、再度大規模延焼シミュレーションを実行する必要はない (図 4.6.1-1)。

また、本研究で提案する延焼ポテンシャル・焼失ポテンシャルは、それぞれ加害指標・被害指標であるため、例えば、耐火造建物が多数の木造建物に包囲されているような場合、耐火造建物の加害性は低いものの、被害性は高いなど、両者の区別が可能となる。

7. 延焼阻止可能な限界到着時間の推定

7.1 限界到着時間の概要と火面周長

延焼シミュレーションにより推定される時刻ごとの延焼の進行具合（火面周長）と、消防隊数等から算出される包囲可能な火面周長に基づき、消防隊が延焼阻止可能な限界の到着時間（限界到着時間）を推定する。火面周長は、実際の放水行動を考慮すると、延焼中の建物を包絡する曲線であると考えられる[4]（図 4.7.1-1 左）。本研究では、このような包絡線を広域で推定することが困難であることから、最も周長が短くなる凸包絡線で火面周長を近似する。後述する包囲可能な火面周長の長さ（40m）を考慮すると、現実的な範囲では近似精度は十分であると考えられるが、限界到着時間はわずかに過大推定となる。

限界到着時間以内に到着可能な場合（厳密には、発災から出場までの時間と移動時間の和が、発災から出火するまでの時間と限界到着時間の和より小さいとき）には、延焼阻止に成功するものと仮定する。なお、限界到着時間以降に到着したとしても、部分的に放水することや、別の火災を無事に鎮圧できた消防隊が合流することで焼失棟数を低減できる可能性もあるが、焼失棟数の評価が複雑になるため考慮しない。すなわち、延焼阻止失敗による焼失棟数は、過大推定となる傾向にあることに注意する。

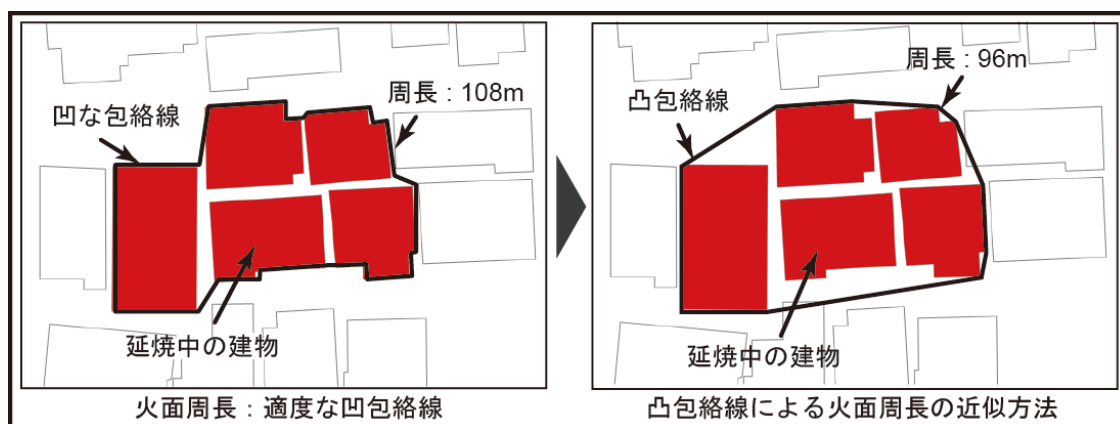


図 4.7.1-1 火面周長の近似方法

7.2 限界到着時間の推定

参考として、東京都内の全建物での延焼シミュレーション結果の平均値に基づく、出火からの経過時間 t と火面周長 L との関係を図 4.7.2-1 に示してある。消防隊数と筒先担当火面長で決まる包囲可能な火面周長を L^* で表すと、式(40)、式(41)より、想定地震 E と風 W における建物 B の限界到着時間 $T_{lm}(B, E, W)$ が定まる。なお、シミュレーションで利用する火面周長 $L(t, B, E, W)$ は、東京都全域での平均値ではなく個々の建物 B での延焼シミュレーション結果から算出している。

$$L^* = n \times d_a + m \times d_b \quad (40)$$

$$T_{lm}(B, E, W) = L^{-1}(L^*, B, E, W) \quad (41)$$

ただし、 d_a は、消防隊によるホース 1 口あたりの筒先担当火面長であり、 d_b は、消防団による筒先担当火面長である。 n 、 m は、それぞれ放水する口数である。

本研究では、火災予防審議会[4]に倣い、より多くの火災へ出場するために、1つの火災現場へは消防隊 2 名が乗車するポンプ車と消防団のポンプ車が 1 台ずつ出場すると仮定している。これは消防力の一次運用と呼ばれる方針であり、詳細については第五章で記述する。すなわち、消防隊は 1 口あたり 15m の 2 口放水 ($d_a=15$, $n=2$)、消防団は 1 口放水で 10m を担当する ($d_b=10$, $m=1$) ものと仮定し、包囲可能な火面周長 D を 40m に設定する。

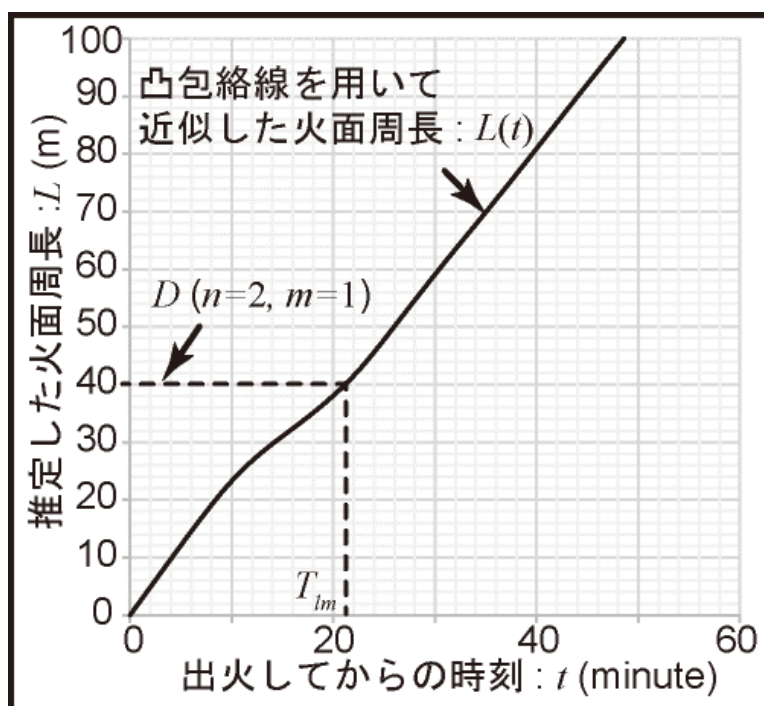


図 4.7.2-1 限界到着時間の推定方法の例

8. 本研究で使用するモデルと東京都での推定結果

8.1 本研究で使用するモデル

建物出火に関しては、火気器具の使用率等と地震動の大きさが主要な変数であると考えられるため、「2. 用途別出火確率モデル」[42,43]で推定する。市街地延焼に関しては、樋本・田中[45]が指摘するように、物理的知見に基づくモデルの方が高精度で推定可能であると考えられるが、詳細な建物データを必要とするため、現状のデータで精度よく分析を行うことは困難であると考えられる。そこで、本研究では、延焼速度式モデル[42,44]と延焼限界距離[46]を用いて構築した「5.2 大規模延焼シミュレーションモデル」により分析を行う。

8.2 出火モデルによる出火件数の推定結果

用途別出火確率モデルに基づく 1,000 回のモンテカルロシミュレーションにより推定した、各消防署管轄内の平均出火件数（図 4.8.2-1）と、管轄の保有するポンプ車台数から平均出火件数を差し引いた値の空間分布（図 4.8.2-2）を示してある。

平均出火件数が 10 件以上となる消防管轄も多いことがわかる。また、平均出火件数がポンプ車台数よりも多い管轄が、東京都全体の約 40%を占めており、5 件以上多い管轄も 10%程度存在する。これらの地域は、同時多発火災時に消防活動が間に合わず、大きな焼失被害が発生する可能性が高い。

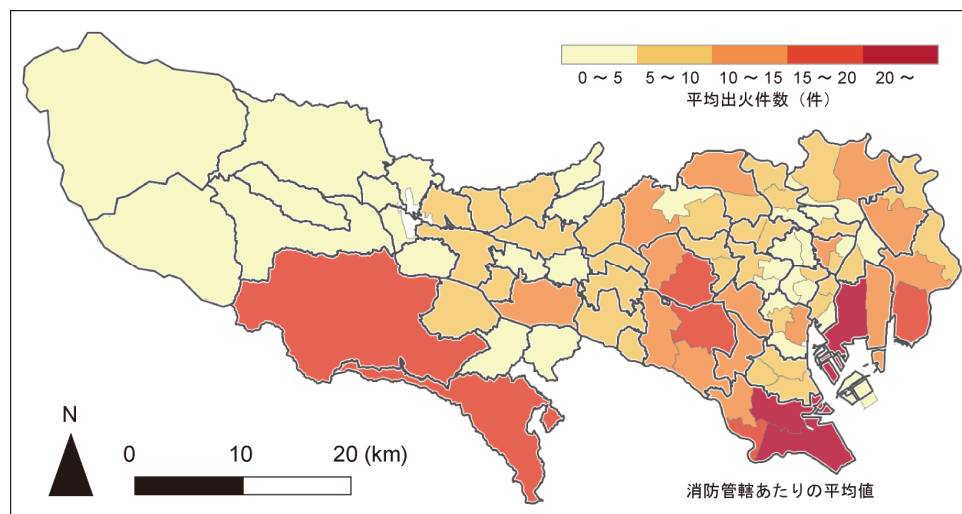


図 4.8.2-1 平均出火件数の空間分布（消防管轄で集計）

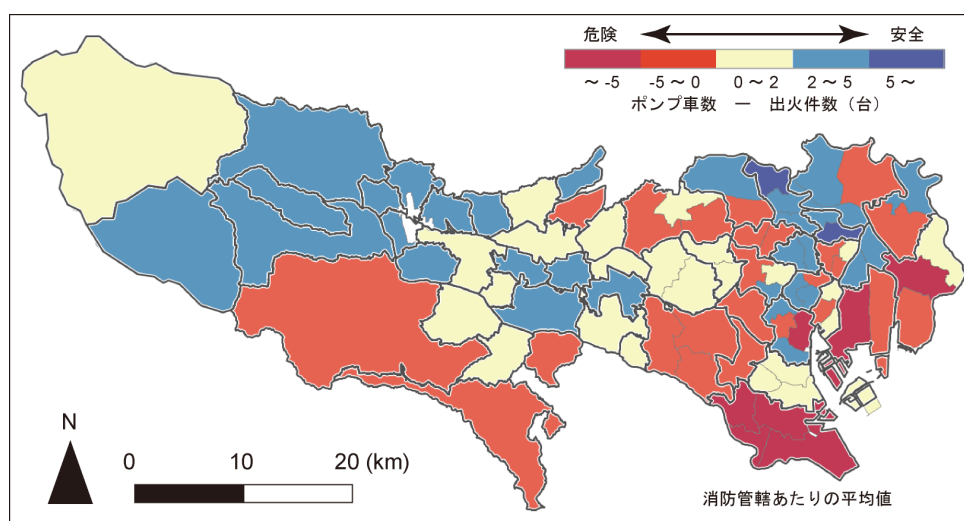


図 4.8.2-2 ポンプ車台数 — 平均出火件数の空間分布（消防管轄で集計）

8.3 延焼ポテンシャルの推定結果

500m メッシュ内に含まれる建物の延焼ポテンシャルの平均値を求め、図 4.8.3-1 にその空間分布を示してある。また、第六章では、東京湾北部地震時の延焼シミュレーション結果のみでなく、工学的基盤に一律 30cm/sec の地震波が到来したことを想定（工学的基盤に一律 30cm/sec の想定）[34]¹²した延焼シミュレーション結果も用いて分析を行うことから、後者の延焼ポテンシャルの空間分布も示しておく。延焼ポテンシャルの高い地域が、東京都区部で環状に広く分布していることが見てとれる（図 4.8.3-1）。特に、ポンプ車台数の差分（図 4.8.2-2）と延焼ポテンシャルがともに大きい管轄は注意が必要である。さらに、東京湾北部地震と工学的基盤に一律 30cm/sec の想定での推定結果は非常に似ていることもわかる。

建物単位の延焼ポテンシャル（図 4.8.3-2 下）をみると、隣接した建物や街区であっても、建物の防火・耐火性能や周辺建物との距離関係等により、延焼ポテンシャルが大きく異なる場合がある。この結果は、建物の延焼危険性を正確に把握するためには、延焼ポテンシャルのようなマイクロスケールの延焼危険性指標が重要であることを示唆している。

¹² 延焼速度の推定には、地表面最大速度ではなく、地表面最大加速度が必要となる。そこで、工学的基盤での速度から、対応する震源からの距離（約 20km）を求め、基盤での加速度を推定した。

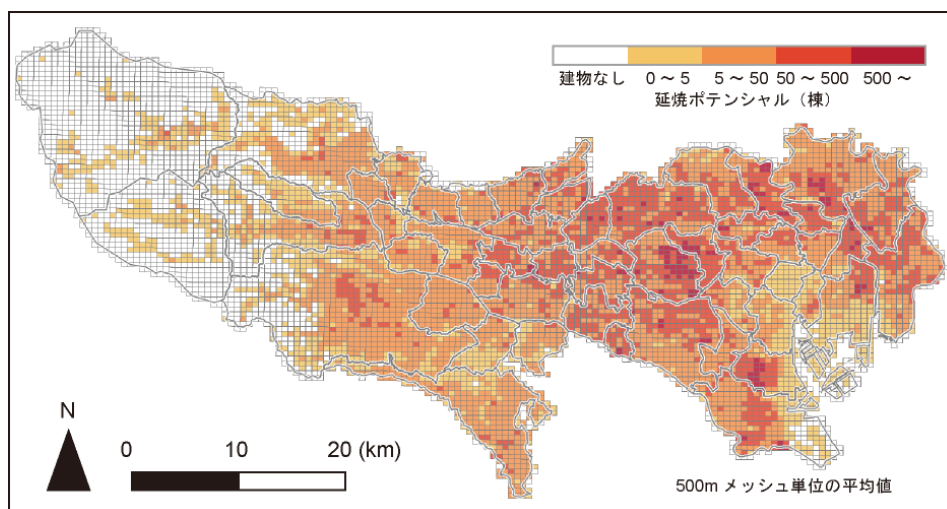


図 4.8.3-1 東京湾北部地震時の延焼ポテンシャルの空間分布
(500m メッシュで集計)

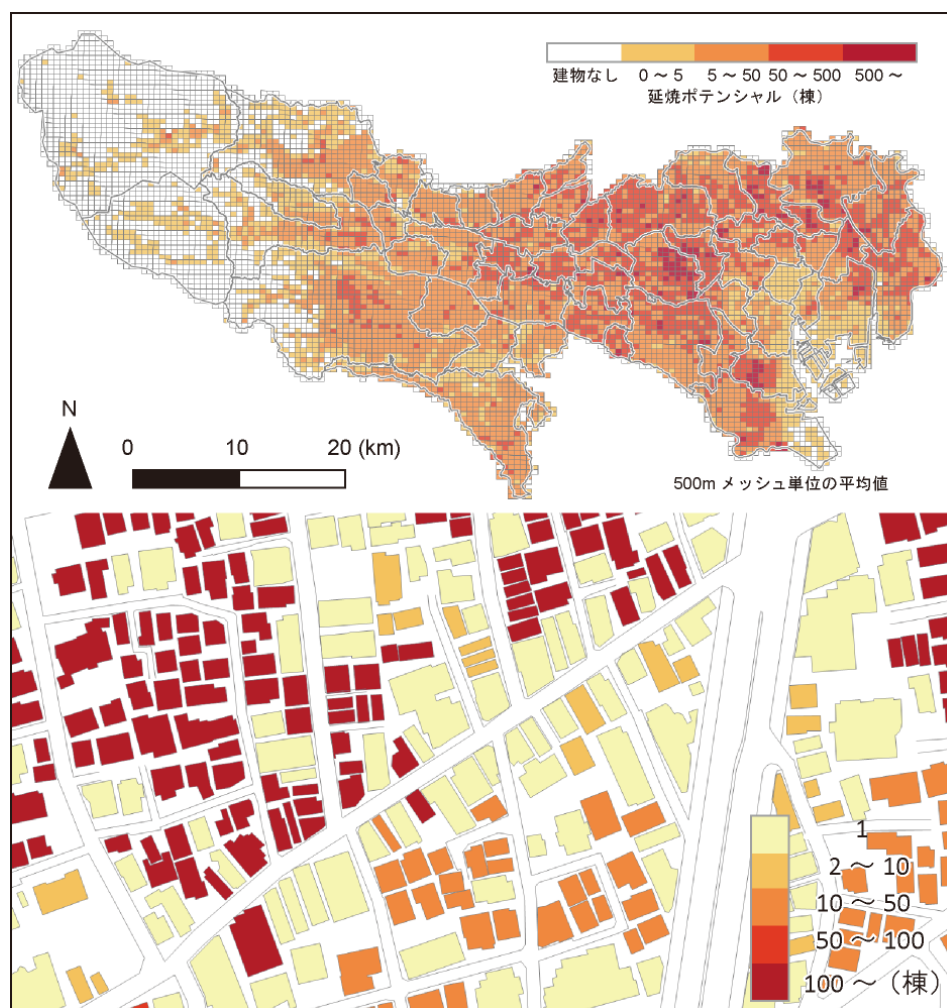


図 4.8.3-2 工学的基盤に一律 30cm/sec の想定での
延焼ポテンシャルの空間分布 (500m メッシュで集計, 建物単位)

8.4 焼失ポテンシャルの推定結果

東京都の火災危険度[34]と比較するため、東京湾北部地震時の焼失ポテンシャルではなく、工学的基盤に一律 30cm/sec の想定での延焼シミュレーション結果に基づく焼失ポテンシャルの空間分布を図 4.8.4-1 に示してある（500m メッシュ内に含まれる建物の平均焼失ポテンシャル）。延焼ポテンシャルと同様に、焼失ポテンシャルの高い地域が環状に広く分布していることや、隣接した建物等でも大きく異なる値を示す傾向が読み取れる。さらに、用途別出火確率モデルにより推定した出火確率と焼失ポテンシャルの比率を図 4.8.4-2 に示してある。東京都内の 50%以上の建物において焼失ポテンシャルは出火確率の 20 倍以上となっており、また、約 100 万棟の建物が 80 倍以上となっている（図 4.8.4-3）。このように焼失ポテンシャルは、自身からの出火だけでなく、周囲の建物からの延焼を考慮したマイクロスケールの焼失危険性指標であるため、優先的に整備を行うべき建物・地域の抽出や、避難場所の選定、重要施設の安全性の確認等のための指標となると考えられる。

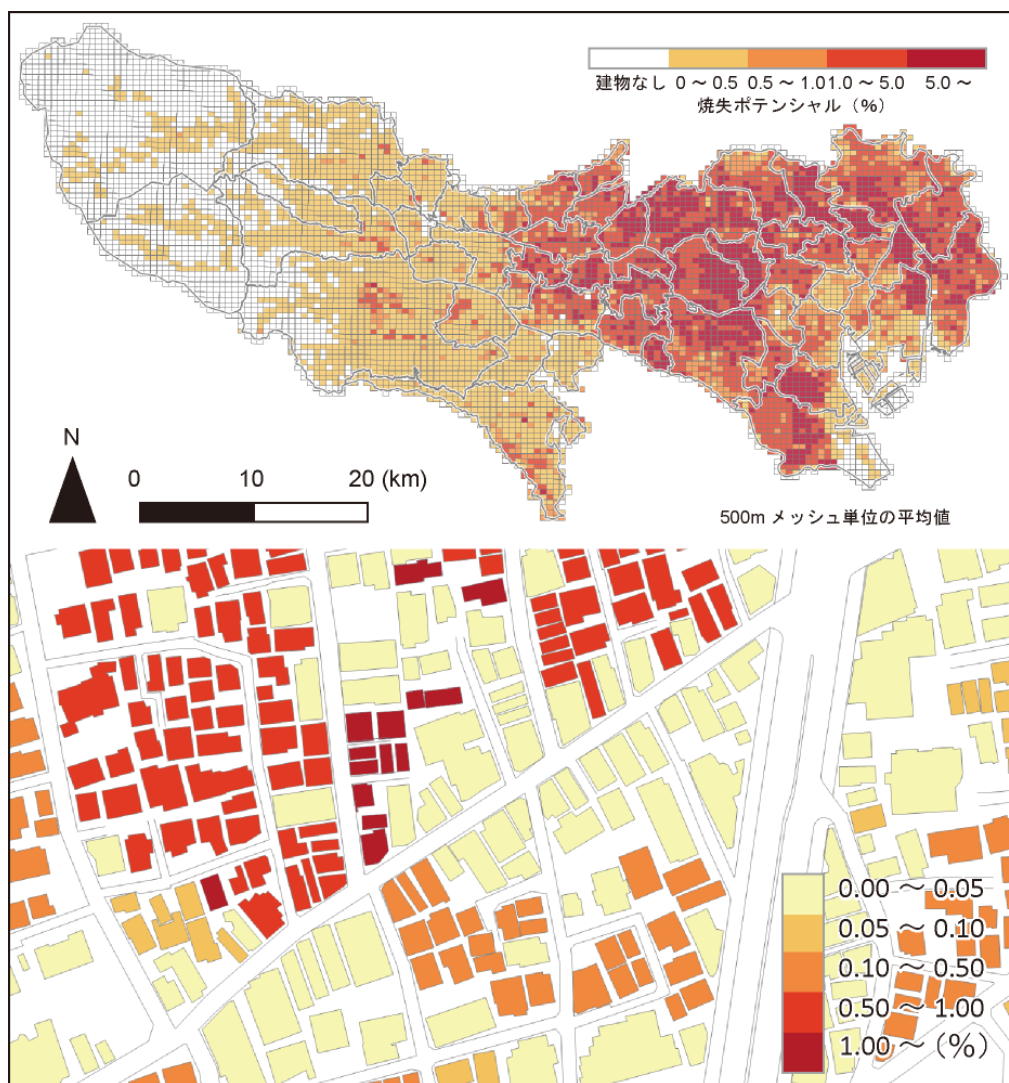


図 4.8.4-1 工学的基盤に一律 30cm/sec の想定での
焼失ポテンシャルの空間分布 (500m メッシュで集計, 建物単位)

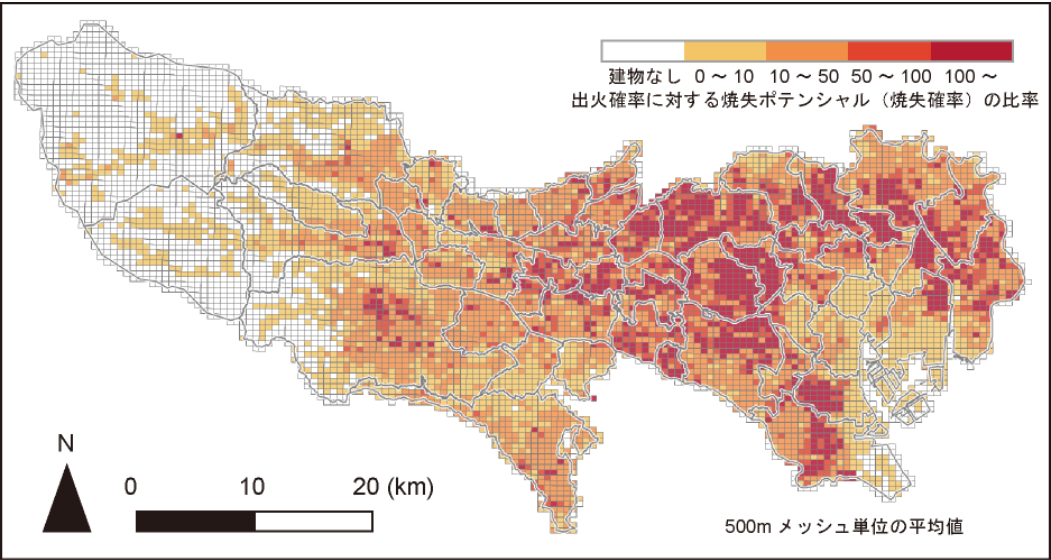


図 4.8.4-2 出火確率に対する焼失ポテンシャル（焼失確率）の比率
(500m メッシュで集計)

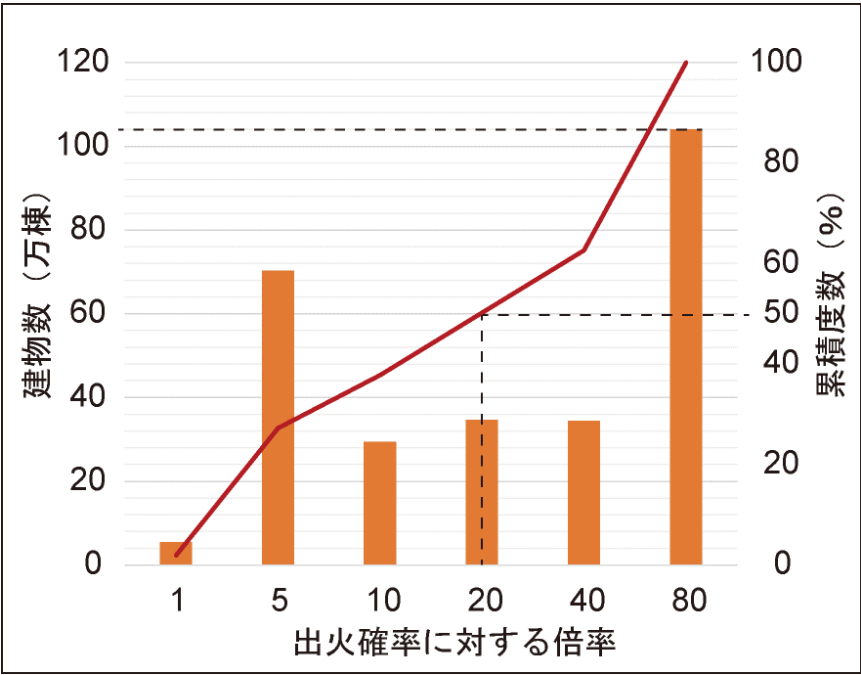


図 4.8.4-3 出火確率に対する焼失ポテンシャル（焼失確率）の比率のヒストグラム

東京都による火災危険度[34]と延焼ポテンシャルは、想定がわずかに異なるため、両者の結果を直接比較分析することは困難であるが、焼失ポテンシャルの特徴を理解するため、東京都の火災危険度との差異について概観する¹³。両者ともに延焼シミュレーション結果に基づく指標であるが、推定結果は大きく異なる（図 4.8.4-4、図 4.8.4-5）。具体的には、焼失ポテンシャルに基づく危険度の方が、東京都区部と市部の境界部分(A)や北東部(B)で高く、都心部では低い（図 4.8.4-4）。

火災危険度では 250m メッシュごとに 9 箇所の出火点を設定し、6 時間の延焼シミュレーションを実行しており、延焼範囲が重ならないものと仮定して焼失棟数をカウントしている。一方、焼失ポテンシャルでは、時間の制約を設けずに延焼が収束するまでシミュレーションを実行しており、さらに、全建物それぞれからの出火を想定して延焼シミュレーションを実行しているため、このような差異が生じていると考えられる¹⁴。

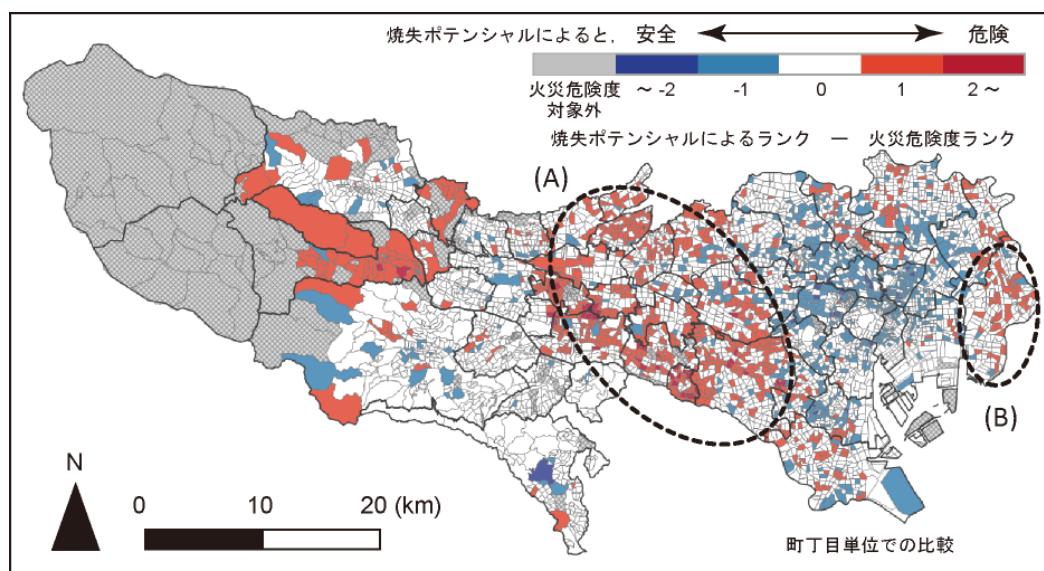


図 4.8.4-4 東京都の火災危険度と焼失ポテンシャルの比較（町丁目単位）

¹³ 火災危険度は、延焼シミュレーションにより町丁目ごとに推定される、単位面積当たりの焼失棟数に基づき設定されている。そこで、町丁目ごとの合計焼失ポテンシャル（焼失棟数の期待値）に基づき、単位面積当たりの焼失棟数を推定し、火災危険度と同様の方法で、危険度ランク（危険性が高い地域から順に 5, 4, 3, 2, 1）を設定した。

¹⁴ 火災危険度は平成 18 年現在の建物データに基づき推定されているため、平成 23 年までの 5 年間に進んだ不燃化等の効果もある。

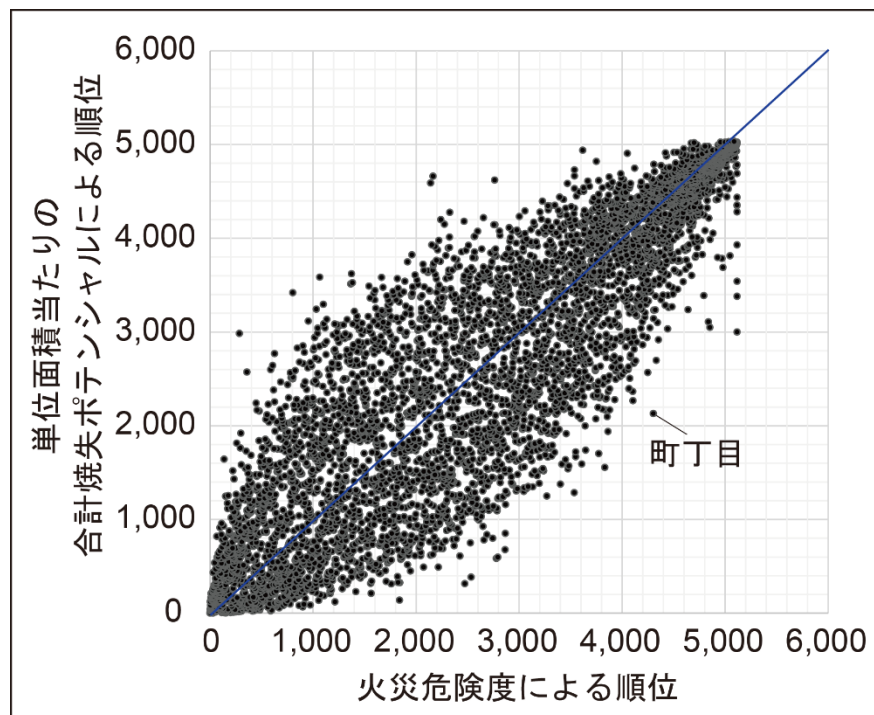


図 4.8.4-5 火災危険度による順位と焼失ポテンシャルによる順位の比較*

*火災危険度は5段階の火災危険度ランクだけでなく、町丁目ごとの順位（1位～5116位）も公開されている。図 4.8.4-5 では、この順位と焼失ポテンシャルから推定される各町丁目の危険性順位を比較する。

8.5 限界到着時間の推定結果

500m メッシュ内に含まれる建物の限界到着時間の平均値を求め、図 4.8.5-1 にその空間分布を示してある。限界到着時間をみると、ほとんどの地域で出火から 25 分以内に到着しなければならず、火災を覚知する時間等も含めると、火災現場までの移動に割ける時間は平均で 10 分～20 分程度と非常に短いと考えられる。

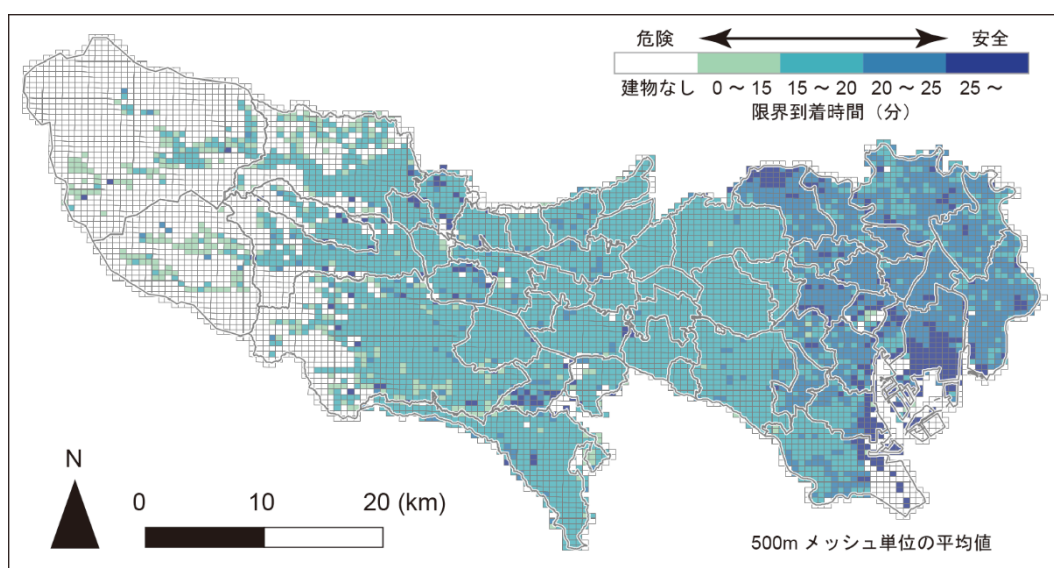


図 4.8.5-1 限界到着時間の空間分布（500m メッシュで集計）

9. 第四章のまとめ

第四章では、消防活動戦略を評価する上で最も重要となる建物出火と市街地延焼について述べた。まず、建物用途（ごとに集計された火気器具の保有率等）や震度、時間帯等に基づく出火確率モデルや、市街地延焼モデルについて整理した。特に、市街地延焼を記述するモデルである、延焼クラスタモデルとマイクロスケールの延焼シミュレーションモデルについて、その特徴を比較した。マイクロスケールの延焼シミュレーションモデルでは、精緻なシミュレーション実験が行える半面、計算負荷が高いために、これまではサンプリングにより延焼被害を近似的に推定していた。一方で延焼クラスタモデルでは、計算負荷が幾分軽減されるが、最終的な延焼被害のみを簡易的に推定するモデルであるために、時刻ごとの延焼被害状況や延焼の異方性等による延焼被害の変動といった、消防活動時に重要とされる情報が欠落する。以上を踏まえて、大地震時の消防活動戦略の検討を行う上では、延焼シミュレーションの問題点とされる計算負荷を軽減し、大規模延焼シミュレーションを実現する必要性が高い。

そこで、延焼シミュレーションにより、時刻ごとに延焼被害状況を推定する問題を、最短経路探索問題として捉えることにより、従来まで計算困難であると考えられていた大規模のマイクロスケール延焼シミュレーションが実現可能であることを示した。最後に、東京都内のすべての建物を対象とした、大規模な延焼シミュレーション実験を行った。その結果として、新たに2つの延焼危険性指標（延焼ポテンシャル、及び、焼失ポテンシャル）と、消火限界となる到着時間（限界到着時間）を建物単位で推定した。延焼ポテンシャルとは、放

任火災となった際に周辺の建物を焼失させる度合いであり、建物単位での延焼の加害性を表現している。もうひとつの危険性指標である焼失ポテンシャルは、自身からの出火だけでなく、周囲の建物からの延焼も考慮した焼失確率であり、建物単位での延焼の被害性を表現している。

東京都全域でのシミュレーション結果によると、平均出火件数がポンプ車台数を上回る消防管轄が全体の約 40%を占めることが判明した。加えて、ポンプ車台数を 5 件以上上回る管轄も 10%程度存在していることが判明した。また、延焼ポテンシャルの高い地域は、東京都区部を環状に広く分布していることが判明した。特に、延焼ポテンシャルと出火件数の双方が高い地域では、同時多発火災時に消防活動が間に合わない可能性が高い。このような地域では、延焼危険性の高い火災を特定し、優先的に消防活動を行う必要性が高いと考えられる。さらに、建物単位の延焼ポテンシャルを見ると、隣接した建物や街区であっても、建物の防火・耐火性能や近傍建物との関係性により延焼ポテンシャルが大きく異なる場合があることが確認された。すなわち、建物の延焼危険性を正確に把握するためには、延焼ポテンシャルのようなマイクロスケールの延焼危険性指標を用いることが重要である。限界到着時間の推定結果によると、ほとんどの地域で出火から 25 分以内に消火活動を開始しなければ、想定している消防力では火災の鎮圧が困難であることが判明した。覚知等に要する時間を考慮すると、移動にかけられる時間は、10 分～20 分程度と非常に短いものと考えられる。すなわち、市街地被害状況下等の広域移動が困難である場合には、火災を覚知した直後に出場しなければ延焼を阻止できない可能性が高いことが判明した。

ただし、出火現象は、火気器具の使用率等の人間行動や火気器具の転倒、可燃物の落下等、様々な要因が関係するため、高精度での推定が困難である。このことに起因する問題は、第六章で議論する。また、市街地延焼に関しては、詳細な建物や市街地データが入手可能であれば、説明変数も多く、物理的な知見を取り入れたモデルの方が高精度で推定できる可能性がある。詳細なデータの整備や防災・減災研究に対する提供体制等も含め、今後の課題となっている。

第五章

消防活動モデル

1. 大地震時の消防運用について

本研究では、消防運用の方針を以下のように想定する。まず、大地震時には同時多発火災となることから、より多くの火災へ出場するために、消防隊 2 名が乗車するポンプ車 1 台と消防団のポンプ車 1 台の一组が 1 つの火災現場に出場することを仮定する[4]。すなわち、出場可能台数は、消防署および出張所の保有するポンプ車台数とする。これは、消防力の一次運用と呼ばれる方針である[6]。一次運用で鎮圧できなかった火災については、他の火災現場を鎮圧した消防隊が合流（転戦）して鎮圧を試みるが（これを消防力の二次運用と呼ぶ）、本研究では、火災の鎮圧までに要する放水時間や別の火災現場への移動時間等を考慮し、一次運用段階での焼失棟数の低減効果を最大化することを目的とする。すなわち、延焼阻止失敗に起因する焼失棟数は過大推定となる傾向にある。大地震発生からの一連の消防活動の全体像を図 5.1-1 に整理してある。まず、兵庫県南部地震時の出火時刻の分布（式(42)）に従い、火災が発生するものと仮定する[4]（図 5.1-2）。

$$y(t) = 1 - 0.674\exp(-0.02t) \quad (42)$$

ここで、 t は発災からの経過時刻（分）であり、 $y(t)$ は時刻 t における出火件数の累積割合である。この分布によると、発災から 15 分後までに全体の約 50% の火災が発生するが（同時多発火災）、それ以降は少しずつ発生していくため、60 分経過後であっても約 20% の火災が未出火であることがわかる。

消防隊は、出火した火災を住民からの通報等により覚知し、出火から 5 分後に出場可能となると仮定する。このとき、出場基準等に基づき出場の有無を判断する（第 2 節）。出場先決定戦略と非出場（放任）火災による焼失棟数については、第六章で分析を行う。そして、出場する場合には、使用する消防水利を決定し、消防水利までは消防車両で向かい、消防水利からは消防隊員がホースを持って向かうものとする。このような火災現場までの移動に関するモデルについては第 3 節で説明する。推定された移動時間が限界到着時間より小さいとき（厳密には、発災から出場までの時間と移動時間の和が、発災から出火するまでの時間と限界到着時間の和より小さくなるとき）に延焼阻止に成功するものとする。消防隊の移動支援戦略と延焼阻止失敗に伴う焼失棟数との関係は、主に第七章で分析する。このとき、各戦略の評価基準として用いる、出場できなかった火災、および、延焼阻止に失敗した火災による最終的な焼失棟数の平均値は、1,000 回のモンテカルロシミュレーションにより推定する。

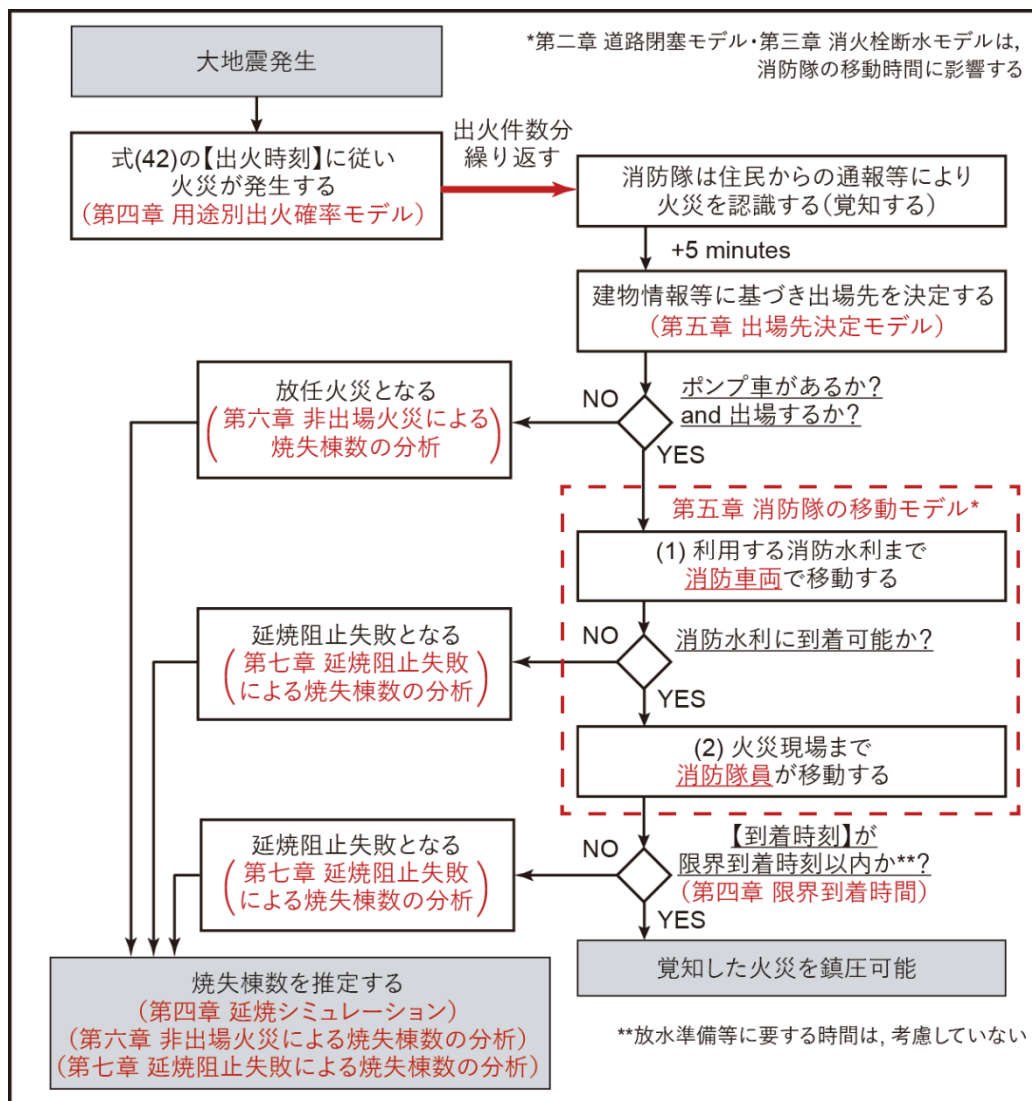


図 5.1-1 消防活動モデルの全体像（管轄単位）

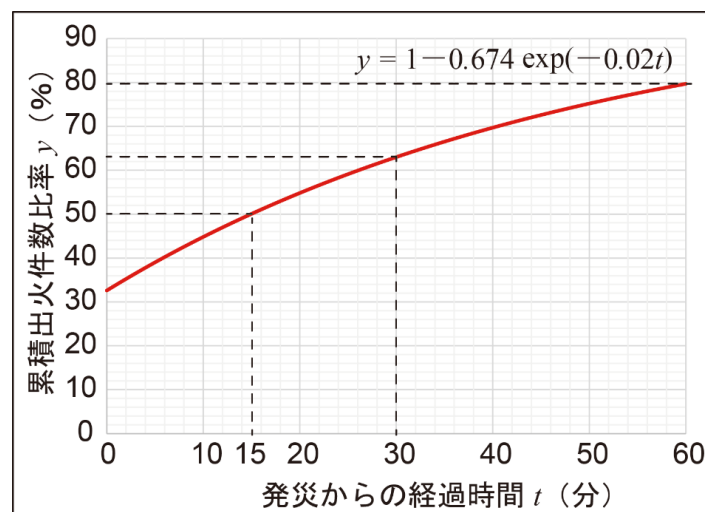


図 5.1-2 出火時刻の累積分布（発災後 60 分までを抜粋） [4]

2. 同時多発火災時における出場先決定モデル

2.1 同時多発火災時の出場先決定モデルの概要

消防隊は火災発生 of 通報を受けた後、その建物の延焼危険性（延焼ポテンシャル）や発災からの経過時間等に基づき出場の有無を決定するものと仮定する。出場先決定戦略は、以下の 4 つの戦略を比較・分析する。消防隊が出場しなかった火災は、放任火災となり、建物の耐火性能が高く内部で自然に鎮火するか、広幅員道路等の延焼遮断帯に到達すること等で自然に鎮火するまで延焼を続けるものとした。

(A) 通報順

通報された順に即時出場する戦略。建物情報（延焼ポテンシャル等）を使わない場合の参考値として利用する。

(B) 一時待機

火災予防審議会の戦略[4]を参考に、延焼危険性の非常に高い地域（後述する震災第一・第二出場区）からの出火が通報された場合は即時出場し、それ以外は 15 分間待機した後、延焼危険性の高い震災出場区から順に出場する戦略。

(C) 管轄内最適化

建物単位の延焼ポテンシャルと出火確率、保有するポンプ車台数を用いて、管轄ごとに最適な出場基準（延焼ポテンシャルの値）を設定し、その基準に従い即時出場する戦略。

(D) 全出火把握

出火する全ての建物とその建物の延焼ポテンシャルを事前に把握しており、延焼ポテンシャルの高い建物から優先的に即時出場できることを仮定した仮想的な戦略。現実には、この戦略は不可能であるが、出場しなかった火災（放任火災）による焼失棟数が（現実的な範囲で）最小になるという意味で参考値として利用する¹⁵。

¹⁵ 延焼阻止可能性を考慮していないため、延焼阻止失敗による焼失棟数を考慮すると、最小とならない可能性もある。ただし、M7.3 規模の地震であり、かつ、出場する火災の候補が管轄内で閉じているのであれば、火災ごとの移動困難性は等価であるとみなしても、実用上大きな問題とならない。また、現実的な範囲で最小というのは、M7.3 規模の地震であれば、近傍で複数の火災が発生しないと考えられるためである。近傍から複数出火する可能性がある場合での、有効性の検証は第六章で議論する。

2.2 火災予防審議会を参考とした一時待機

火災予防審議会[4]が出場先決定の際に用いる震災出場区は、広域避難場所・避難道路の周囲 200m に存在するかどうか、および、東京消防庁の延焼危険度ランク¹⁶[5]によって5つのカテゴリに分けられている（危険性の高い地域から順に、震災第一出場区・震災第二出場区・震災第三出場区・震災第四出場区・震災第五出場区）。本研究では、震災出場区のデータが入手困難であることから、広域避難場所のポイントデータと、延焼シミュレーション結果から推定した延焼危険度ランクを参考に、震災出場区を推定した（図 5.2.2-1）。

(B) 一時待機戦略では、基本的に①15 分間待機し危険な火災に備える。そして、②待機中に危険な地域（震災第一・第二出場区）から覚知した場合に即時出場する。③15 分待機後、ポンプ車が残存している場合（即時出場しなかったポンプ車が存在する場合）には、それまでに覚知された火災で優先度が高い出場区に所属する火災から順に出場する（震災第三、第四、第五出場区の順に出場する）。ただし、同一出場区内の優先度は定められていないため、本研究では、延焼阻止可能性を考慮して、出火時刻の遅い火災から順に出場するものと仮定した。また、他の戦略との条件をそろえるため、④15 分間に覚知した全ての火災に出場した後に、ポンプ車が残存している場合には、15 分以降に覚知された建物に対して、通報順に即時出場するものと仮定した。

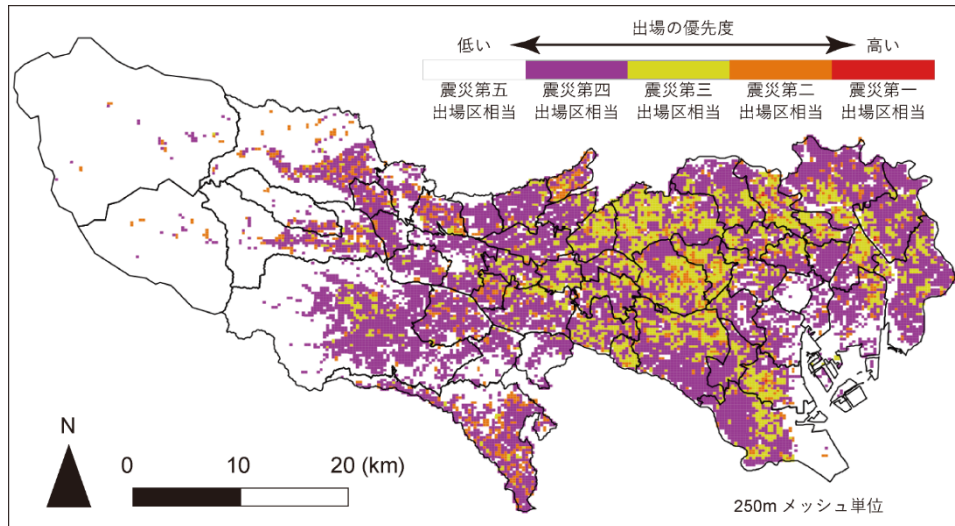


図 5.2.2-1 推定した震災出場区*

*震災出場区は、延焼危険度ランクや広域避難場所の位置等に基づき、市街地を5段階（危険性の高い地域から順に震災第一出場区・震災第二出場区・震災第三出場区・震災第四出場区・震災第五出場区）に分類されている。(B) 一時待機戦略では、特に危険性の高い、震災第一出場区・震災第二出場区からの火災を覚知した場合に、即時出場するものとしている。

¹⁶ 東京消防庁[5]によると、延焼危険度ランクは、延焼面積（出火から6時間までに延焼した建物を包絡する多角形の面積）と、焼失面積（出火から6時間までに延焼した建物の合計延べ床面積（耐火造建物は1階分のみ））を用いてランク付けされている。

2.3 延焼ポテンシャルに基づく最適な即時出場基準の推定

従来までは、出場する時点で今後どの程度危険な火災が発生するのかが不明であり、延焼危険性の高い火災に出場するには、(B) 一時待機戦略のように、情報収集のために待機するしかなかった。すなわち、待機時間と延焼阻止に失敗するリスクを比較し、最適な待機時間について検討する研究が多かった[3,4]。このような待機を伴う戦略では、待機時間内に得られる情報が限定され、待機後に延焼危険性の非常に高い火災が発生したとしても出場することができない。

しかし、最終的に出火する全ての建物が事前に判明していれば、延焼危険性の高い建物から順番に即時出場することで焼失被害を大幅に低減することが可能となると考えられる ((D) 全出火把握)。現実的には、このような戦略 ((D) 全出火把握) は不可能であるが、例えば、建物単位の延焼ポテンシャルや出火確率を用いれば、発生するであろう全火災の中での、通報された火災の相対的な延焼危険性を予測することは可能であると考えられる。そして、相対的な延焼危険性（優先順位）と、管轄 k 内のポンプ車台数 N_{pk} を用いて、管轄ごとに適切な出場基準を設定し、出場基準以上の延焼ポテンシャルを持つ建物から通報された際に即時出場する戦略が (C) 管轄内最適化戦略である。

実際には、通報されたタイミングではなく、発災直後に地震規模等 E_{real} をもとに自動的に任意の建物 B における出火確率 $P_{fire}(B, E_{real})$ を推定し¹⁷、全建物に対して地震規模に応じた延焼危険性の順位を計算しておくことで、発生した地震 E_{real} に対して管轄 k の最適な延焼ポテンシャルの閾値 $P_{FSk}^*(E_{real})$ を設定する。次に、通報された建物（通報建物）の延焼ポテンシャルがこの閾値以上であれば即時出場し、それ未満であれば待機する。以上を定式化すると、式(43)～式(47)となる。具体的には、式(43)で表現される管轄 k 内に存在する全建物集合 B_{sk} の中で延焼ポテンシャルが、ある P_{FSk} 以上の建物集合 $B_{Sk}^*(P_{FSk})$ に対して、式(44)、式(45)を用いて、この地震 E_{real} における出火件数の期待値 $E[X_k|E_{real}, P_{FSk}]$ と分散 $V[X_k|E_{real}, P_{FSk}]$ を推定し、式(47)を最小とするような延焼ポテンシャル P_{FSk}^* を数値計算により求める。

$$B_{Sk}(P_{FSk})^* = \{ B \in B_{sk} \mid P_{FS}(B) \geq P_{FSk} \} \quad (43)$$

¹⁷ 延焼ポテンシャルについては、あらかじめ推定しておくことで、大地震時の混乱した状況下であっても、効率よく即時出場基準を推定できる。ここで利用する延焼危険性の推定精度は、火災の予測順位が変化しない程度で問題なく機能するものと考えられる。例えば、風向きが変化した場合であっても、危険性順位の推定誤差による焼失棟数への影響が、(数万棟の焼失棟数に対して、) 数十棟程度であることを確認している。首都直下地震であれば、震源位置によらず、工学的基盤に一律 30cm/sec の想定での延焼ポテンシャルと高い相関を示すことから、本研究では、工学的基盤に一律 30cm/sec の想定での延焼ポテンシャルの値を用いて即時出場基準を推定する（すなわち、延焼ポテンシャルを $P_{FS}(B, E_{real}, W)$ ではなく、 $P_{FS}(B)$ として扱う）。この想定は、各建物の直下で地震が発生した場合の想定であると考えられる。また、平常時であれば延焼シミュレーションの計算負荷は低いため、複数の条件下で延焼ポテンシャルを推定しておき、発災時の風向きの予報等に基づき、最も近いシミュレーション条件での延焼ポテンシャル $P_{FS}(B, W)$ を検索することも可能である。

$$E[X_k|E_{real}, P_{FSk}] = \sum_{B_{ki} \in Bsk(P_{FSk})^*} P_{fire}(B_{ki}, E_{real}) \quad (44)$$

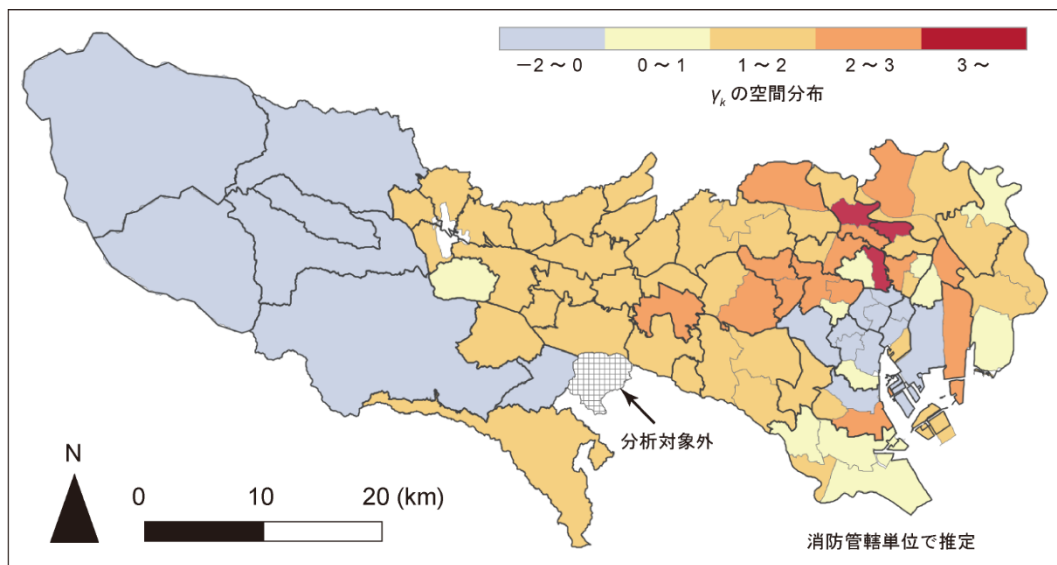
$$V[X_k|E_{real}, P_{FSk}] = \sum_{B_{ki} \in Bsk(P_{FSk})^*} P_{fire}(B_{ki}, E_{real}) (1 - P_{fire}(B_{ki}, E_{real})) \quad (45)$$

$$P_{fire}(B_{ki}, E_{real}) = P[use(B_{ki}), I(B_{ki}, E_{real}), S] \quad (46)$$

$$P_{FSk}^*(E_{real}) = \underset{P_{FSk}}{\operatorname{argmin}} (|E[X_k|E_{real}, P_{FSk}] + \gamma_k \sqrt{V[X_k|E_{real}, P_{FSk}]} - Np_k|) \quad (47)$$

ここで、 $P_{FS}(B_{ki})$, $use(B_{ki})$, $I(B_{ki}, E_{real})$ は、それぞれ建物 B_{ki} の延焼ポテンシャル、用途、地震 E_{real} での計測震度である。 X_k は $Bsk(P_{FSk})^*$ 内の出火件数を表す確率変数であり、地震 E_{real} と閾値 P_{FSk} の条件下での期待値と分散をそれぞれ、 $E[X_k|E_{real}, P_{FSk}]$, $V[X_k|E_{real}, P_{FSk}]$ と表す。 $P_{fire}(B_{ki}, E_{real})$ は建物 B_{ki} の出火確率であり、 S は全建物で共通な変数（季節や時間帯）である。ただし、ここでは建物倒壊が出火確率へ及ぼす影響は考慮しない。 γ_k は、出火件数の推定値を補正する安全率であり、消防隊移動モデルを用いずに、管轄ごとに非出場（放任）火災による平均焼失棟数が最も少なくなるように算出した。具体的には、管轄ごとに、 γ_k を $-2.0 \sim +5.0$ まで 0.1 刻みで変化させ、平均焼失棟数が最も少なくなるように γ_k を調整した。ただし、出火は主に火気器具等の使用に依存する確率的な現象であるため、高精度での推定が困難である。加えて、木密地域等で出火件数を過小推定した場合には、即時出場基準が下がり、後に発生する延焼危険性の高い火災に対応できなくなる可能性がある。この現象による危険性は市街地特性により異なるため、 γ_k を用いて補正しているが、焼失棟数の平均的な低減効果をもとに γ_k を定めると、約 80% の管轄で $\gamma_k > 0$ となる（図 5.2.3-1）。これにより生じる問題については、第六章で議論する。

また、最適な即時出場基準の空間分布（図 5.2.3-2）をみると、東京都区部等では延焼ポテンシャルが 5 棟以下から 100 棟以上まで大きくばらつきがあることがわかる。すなわち、全管轄で一律の出場基準を用いることは困難であると考えられる。さらに、効果的に焼失棟数を低減可能な出場基準を推定するためには、建物単位の延焼危険性指標である延焼ポテンシャルが重要な役割を担っている。つまり、東京都全域での大規模延焼シミュレーションが実現できたことの意義は大きい。

図 5.2.3-1 γ_k の空間分布*

* γ_k は、危険な火災集合からの出火件数の推定値を補正する係数（安全率）であり、具体的には、出火件数の期待値に γ_k 倍の標準偏差を加算することで補正している。平均的な焼失棟数の低減効果をもとに γ_k を最適化すると、ほとんどの管轄で γ_k が 1 よりも大きくなる。この結果は、出火件数が過大推定される傾向にあることを示している。

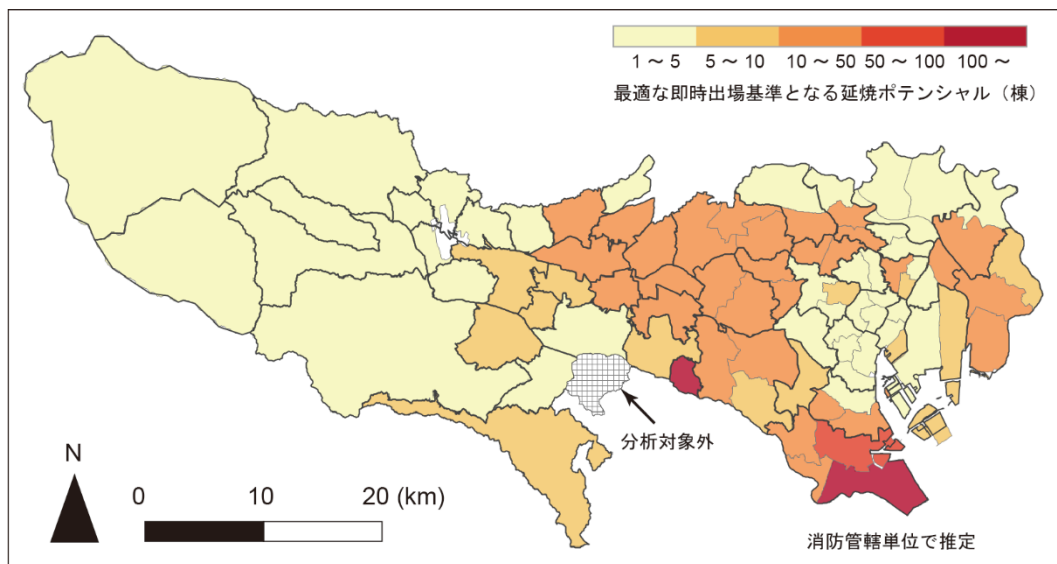


図 5.2.3-2 管轄ごとの最適な即時出場基準となる延焼ポテンシャルの空間分布*

*この延焼ポテンシャルは、発生した地震に依存しない工学的基盤に一律 30cm/sec の想定での延焼ポテンシャルに基づき推定しているため、発災後に延焼シミュレーションを実行する必要はない。実際の地震時には、通報された建物の延焼ポテンシャル（推定済み）と即時出場基準を比較し、基準よりも大きい場合には、即時出場すればよい。

3. 市街地被害を考慮した消防隊の移動モデル

消防隊は、消火活動に使用する消防水利まで消防車両で向かい、消防水利からは消防隊員がホースを持って火災建物へ向かうという一連の行動をモデル化した（図 5.3-1）。

①出火の覚知と出場準備

出火してから出場するまでに、覚知や出場準備のために 5 分間を要すると仮定した。すなわち、移動開始時刻は出火時刻から 5 分後とする。

②使用する消防水利の決定

使用する消防水利は式(48)に基づき決定する。

$$ws^*(ff, ws, fire) = \operatorname{argmin}_{ws \in WS} \left(T_n(ff, ws) + \frac{D_e(ws, fire)}{speed_{Ff}} \right) \quad (48)$$

ここで、 ws^* は使用する消防水利であり、 WS は消防水利の集合¹⁸（ただし、到着不能・使用不能と判明したものは除外する）、 $T_n(A, B)$ は A～B 間の移動時間、 $D_e(A, B)$ は A～B 間の直線距離、 ff と ws 、 $fire$ はそれぞれ消防隊、消防水利、火災建物の位置を表す。 $speed_{Ff}$ は、消防隊員の通行速度（10km/h）である。

③移動速度と通行可能道路

消防車両と消防隊員では異なる通行速度を設定し¹⁹、通行可能道路（それぞれ幅員 4m 以上の道路、全ての道路）も区別する。

④道路が閉塞している場合の経路探索

消防隊はまず、すべての道路が通行可能であると想定して経路探索を行う。目的地へ向かう途中、道路閉塞により通行できない場合には、その位置から再度、最適な消防水利と経路を探索する。このとき、経路探索や方向転換等に 30 秒を要すると仮定する。また、遭遇した道路閉塞を記憶しており、それらを回避した経路を再探索するものとする。

¹⁸ ホースの長さ（20m）と本数（2 口放水のため 22 本）、道路の屈曲率（0.7）を考慮し、火災現場を中心に半径 308m（ $20 \times 22 \times 0.7$ ）以内に存在する消防水利のみを対象とする[4]。

¹⁹ デジタル道路地図（DRM）データに含まれる道路幅員と規制速度の関係をクロス集計したデータに基づき、東京消防庁の道路データでの規制速度を道路単位で推定した。さらに、道路混雑等を考慮して、緊急輸送道路に指定されている道路では、規制速度の 0.5 倍の速度で通行するものと仮定した。緊急輸送道路以外の道路では、広幅員道路（幅員 6m 以上）は、規制速度の 0.4 倍の速度、その他の道路（幅員 6m 未満）は、規制速度の 0.2 倍の速度で通行するものと仮定した。この仮定により、消防車両は広幅員道路を優先して通行することになる。また、消防隊員の速度は、道路幅員等によらず一律 10km/h と仮定した。

⑤到着した消防水利が消火栓であり、かつ、断水している場合

到着した消防水利が断水した消火栓である場合には、そこから別の消防水利（消火栓以外）へ向かうものと仮定する。

⑥十分な放水と転戦

放水に要する時間等を考慮し、火災を鎮圧後に別の火災建物への転戦は行わないものとし、火災建物へは十分な放水が行えるものと仮定する。

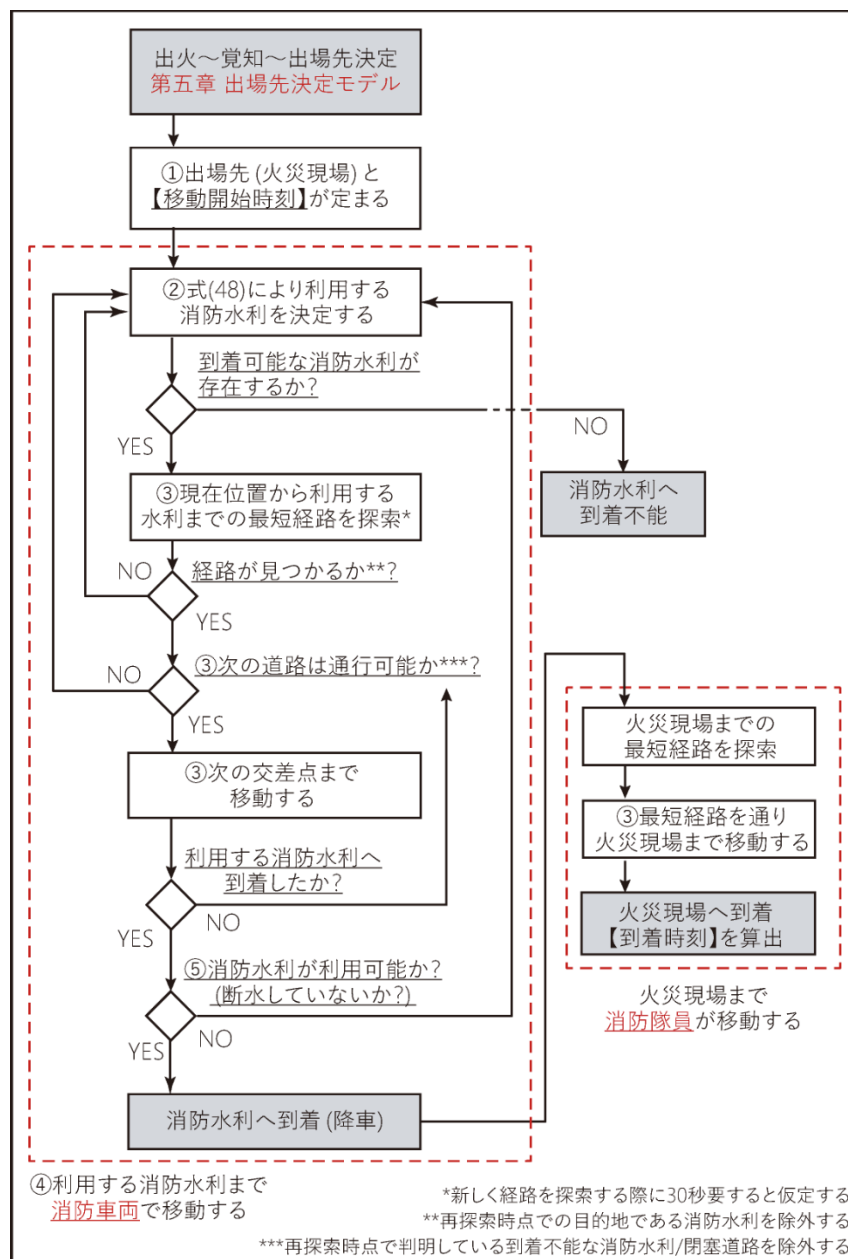


図 5.3-1 消防隊移動モデルの詳細（消防隊単位）

4. シミュレーションの想定

第六章以降で基本となるシミュレーション条件²⁰を表 5.4-1 にまとめておく。特に記載のない場合は、以下の条件下でのシミュレーション結果を分析する。なお、この想定は第二章から第四章までの物的被害推定時の条件とそろえてある。

表 5.4-1 シミュレーションの想定

想定	内容
(1) 対象地域	東京都全域（稲城管轄以外 ²¹ ）
(2) 地震	東京湾北部地震（M7.3）
(3) 風向・風速	北風 8m/sec
(4) 湿度	50%
(5) 季節／発災時刻	冬季／夕刻
(6) 通報される情報	位置情報（緯度・経度）、災害事象（閉塞・出火）
(7) 道路状況	(I) 閉塞なし・(II) 閉塞あり
(8) 利用する消防水利	消火栓以外の消防水利（防火水槽や河川等）
(9) 延焼阻止の成功条件	「発災から出火するまでの時間」＋「限界到着時間」 ≤「発災から出場までの時間」＋「移動時間」

(1) 道路状況の想定

道路状況としては、道路閉塞の一切ない (I) 閉塞なしと、市街地被害シミュレーションにより道路が閉塞した場合 ((II) 閉塞あり) の2つを基本とする。

(2) 使用する消防水利の想定

利用する消防水利は、既往研究[3,6]に倣い、消火栓以外の消防水利のみを利用する場合（消火栓以外）を想定した分析を基本とする。

(3) 延焼阻止の成功条件

延焼阻止の成功条件は、第四章で構築した限界到着時間と消防隊の移動時間の比較により判定する。なお、限界到着時間以降に到着する場合（厳密には、発災から出場までの時間と移動時間の和が、発災から出火するまでの時間と限界到着時間の和より大きくなる場合）であっても、部分的に放水することや、別の火災を無事に鎮圧できた消防隊が合流す

²⁰ 風速は、過去の気象データをもとに最大風速の平均値＋2 σ の値を用いている[15]。また、季節／発災時刻は出火件数をもっとも多くなる冬季の夕刻を想定する。

²¹ 稲城管轄は、消防水利データやポンプ車データが欠損していたため、分析対象外としている。

ることで焼失棟数を低減できる可能性もあるが、本研究では、焼失棟数の評価が複雑になるため考慮しない。すなわち、延焼阻止失敗による焼失棟数は、過大推定となる傾向にあることに注意する。

また、第六章では、(2)想定する地震の規模を変更した際の分析と(6)通報される情報に揺らぎがある場合についても分析する。第七章では、(7) 道路状況のうち道路閉塞情報が入手できた場合と(8) 利用する消防水利の選択肢に消火栓を加えた場合を想定した分析も行う。

5. 第五章のまとめ

第五章では、消防活動モデルとして、出場先決定モデルと消防隊移動モデルの 2 つのモデルを構築した。この成果と第四章までのモデルをあわせることで、市街地被害状況下での各消防活動戦略における、非出場（放任）火災による焼失棟数、および、延焼阻止失敗による焼失棟数について分析が可能となった。

出場先決定モデルでは、従来までの待機により延焼危険性の高い火災に備える戦略（一時待機）と、本研究で提案した相対的な延焼危険性の予測に基づく戦略（管轄内最適化）に加え、参考として建物の延焼危険性情報を一切使用しない戦略（通報順）、全知の立場から発生する火災をすべて把握できた場合の理想的な戦略（全出火把握）の計 4 戦略を構築した。消防隊の移動モデルでは、消防水利を経由した基本となる経路探索モデルに、道路閉塞状況下での経路探索モデルや、断水による消防水利の再選択モデル等を加えることで、大地震時の移動経路と移動時間の推定が可能となっている。

第二章から第五章までの一連のモデルを用いて、第六章では、出場先決定戦略と非出場（放任）火災による焼失棟数との関係について分析し、第七章では、消防隊の移動支援戦略と延焼阻止失敗に起因する焼失棟数との関係について分析を行う。

第六章

出場先決定支援と

焼失棟数低減効果との関係

1. 非出場（放任）火災による焼失棟数

1.1 出場先決定戦略の意義とシミュレーション条件

出火シミュレーションにより推定した東京湾北部地震時の出火件数（約 700 棟）のうち、延焼ポテンシャルが 100 棟以上となる建物は、平均 97 棟と比較的少ない。すなわち、延焼危険性の高い建物を優先的に消火できれば、焼失棟数を大幅に低減できる可能性がある²²。

そこで、消防活動シミュレーションにより、延焼ポテンシャルに基づき消防隊が出場先を決定した際の焼失棟数の低減効果を検証する。具体的にはまず、第五章でのシミュレーション条件下で市街地被害シミュレーションを行い、1,000 ケースの異なる被害状況（建物倒壊・道路閉塞・出火延焼）を作成する。次に、各出場先決定戦略（(A) 通報順、(B) 一時待機、(C) 管轄内最適化、(D) 全出火把握）について、1,000 回のモンテカルロシミュレーションにより、最終的な平均焼失棟数を推定する²³。最終的な焼失棟数は、①出場せずに放任火災となった火災による焼失棟数と、②道路閉塞や消火栓の断水により、火災現場への到着が遅れ、延焼阻止に失敗することによる焼失棟数に分けられる。出場先決定戦略では、①非出場（放任）火災による焼失棟数への影響が大きい。待機を伴う戦略等では、②延焼阻止に失敗による焼失棟数へ影響する場合もある。

1.2 一時待機による効果と限界

(B) 一時待機と、建物情報を利用しない(A) 通報順を比較する（図 6.1.3-1～図 6.1.3-3）。(B) 一時待機では、15 分間に収集された火災の中から、延焼危険性の高い建物へ出場するが、(A) 通報順と比較して非出場（放任）火災による焼失棟数の減少はわずかである。15 分間で覚知可能な出火件数が、全体の 50%（図 5.1-2）であることを考慮すると、この結果は、残り半数に存在する延焼危険性の高い火災が焼失棟数へ及ぼす影響が無視できないことを示唆している。また、(B) 一時待機戦略で即時出場の対象となる震災第一・第二出場区に分類される地域は少ないため、多くの火災に 15 分間の待機後に出場することになる。すなわち、待機時間中に延焼が進行することで延焼阻止に失敗する可能性が高くなる。実際、非出場(放任)火災による焼失棟数と延焼阻止失敗に起因する焼失棟数を合わせると、(A) 通

²² 管轄ごとのポンプ車数や管轄の位置、木造住宅密集市街地等の延焼危険性高い建物の空間的な偏り等があるため、必ずしも延焼危険性の高い出火を全て鎮圧できるとは限らない。

²³ (A)～(D)の間では、同一の市街地被害ケースを用いて分析する。すなわち、ひとつの市街地被害ケースに対して計 4 回のシミュレーションを実行する。さらに、これを 1,000 ケースすべてに対して実行し、その平均値を比較する。これ以降のシミュレーション実験でも、想定間の比較を行う際には、同様の条件で分析を行っている。

報順よりも約 10,000 棟多くなっており、(II) 閉塞ありの状況では、平均焼失棟数が 30,000 棟以上になる（図 6.1.3-3）。また、覚知可能な情報を増やすために、待機時間を延長する場合、延焼阻止に失敗するケースも増加してしまう。実際、平均的な限界到着時間が、20 分程度であることを考慮すると、15 分より長く待機したとしても焼失棟数を低減できる可能性は低い（第四章 8.5 限界到着時間の推定結果）。

1.3 管轄内最適化による焼失棟数の低減効果

(C) 管轄内最適化の場合には、(I) 閉塞なし、(II) 閉塞ありともに、(A) 通報順や、(B) 一時待機の場合の半分以下にまで焼失棟数を低減できており、焼失棟数の下限値とみなせる (D) 全出火把握と同程度となっていることがわかる（図 6.1.3-1～図 6.1.3-3）。すなわち、第五章で示した方法（式(43)～式(47)）で管轄ごとに適切な即時出場基準を設定し、待機時間に限界を定めず、基準値以上の延焼ポテンシャルをもつ建物から通報が入った際に、即時出場するという戦略が非常に有効である。

さらに、ここでの最適な即時出場基準の算定根拠とした変数のうち、地震ごとに異なる変数は、建物単位の出火確率のみである。出火確率は、建物用途や震度等から比較的容易に推定可能である²⁴と考えられることから、発災直後の混乱期であっても即時出場基準を地震規模から算出し、具体的な戦略を決定することができる。

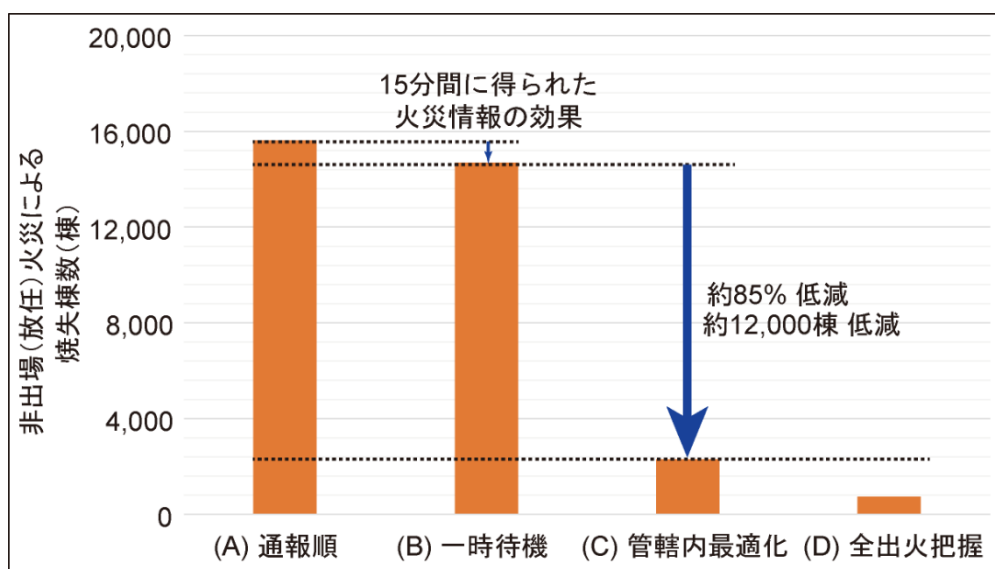


図 6.1.3-1 出場先決定戦略と非出場（放任）火災による焼失棟数（(I) 閉塞なし）

²⁴ 計算負荷の高い空間検索や経路探索等を必要としない。

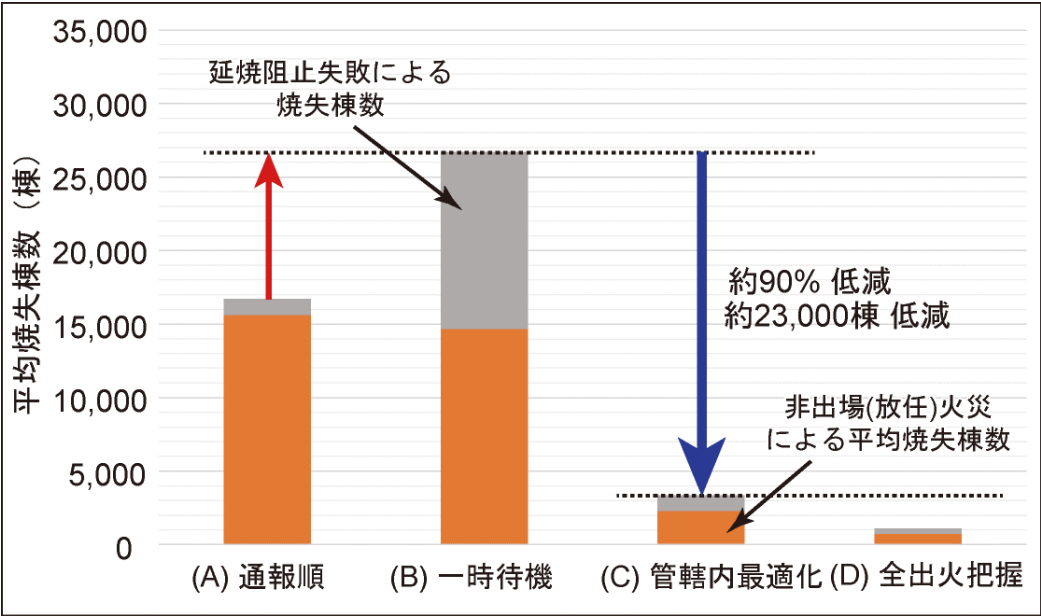


図 6.1.3 -2 出場先決定戦略と平均焼失棟数 ((I) 閉塞なし)

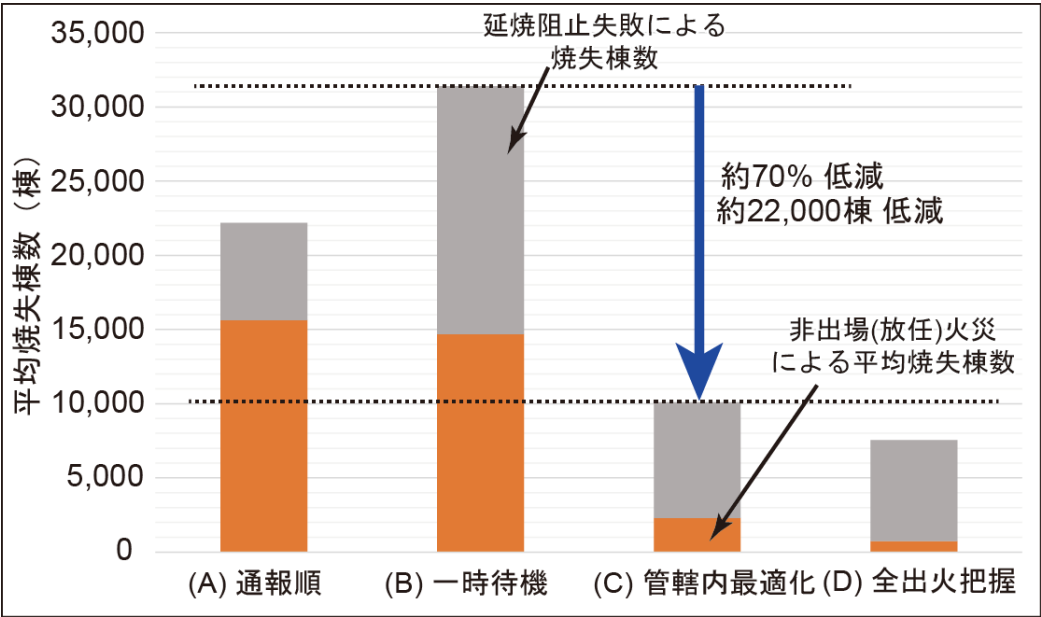


図 6.1.3-3 出場先決定戦略と平均焼失棟数 ((II) 閉塞あり)

1.4 管轄内最適化のリスクと課題

最後に、(C) 管轄内最適化のリスクと課題について議論しておきたい。具体的には、後に発生する延焼危険性の高い火災に備えて、ポンプ車を待機させておくことの是非について考察する。図 6.1.4-1 に、①非出場（放任）となった火災数（焼失棟数ではない）を、図 6.1.4-2 に、(C) 管轄内最適化で非出場となったポンプ車台数²⁵の空間分布を示してある。放任となった火災数は、(C) 管轄内最適化の場合に最も多くなっていることがわかる（図 6.1.4-1）。この差は、後の延焼危険性の高い火災に備えて待機を続けた結果、最後まで出場せずに残ってしまったポンプ車台数である。

同時多発火災時の出場先決定では、優先順位を決定する際に、対象となる火災のすべてを把握できない。具体的には、出火時刻の分布（図 5.1-2）によると、経験的には、全体の約 80% の火災が発生するのは発災から 60 分後とされるのに対し、消火限界となる到着時間は非常に短いため、消防隊は分単位での行動を求められる。すなわち、多くの場合において、出場先を決定する際に、より延焼危険性の高い火災が後から発生する可能性を否定できない。このような状況下で、後に発生する可能性のある延焼危険性の高い火災に対応しようとする、初期に発生した（比較的）延焼危険性の低い火災に出場することができない²⁶。加えて、建物倒壊等とは異なり、出火現象は各建物内で人々が火気器具を使用するか否か等に依存するため、不確実性が高く、出火件数の分散は大きくなる傾向にある（図 6.1.4-3）。すなわち、現状のデータで出火件数の予測精度を向上させることは困難であり、出火件数が予測を下回った場合²⁷には、ポンプ車が非出場のまま残存してしまうことになる。

この問題は、対象となる火災集合が未知である状況下で、市街地被害状況下での広域移動を強いられる（判断ミスが致命的となる）同時多発火災特有の問題であると考えられる。この議論を行う上での前提として、大地震時には出火件数がポンプ車台数を上回る可能性が指摘されており、現状で提案されている各種の出場先決定戦略では、出場先の選択が必要であると考えられている²⁸。すなわち、(C) 管轄内最適化の課題は、出火件数が多くポンプ車が足りていないにもかかわらず、平均的な焼失棟数を低減させるためにポンプ車が残存することを許容できるかという問題である。

²⁵ 出火件数の方がポンプ車数よりも少ない場合に必然的に残存する場合を除外している。

²⁶ 市街地被害状況下での火災現場への移動は容易ではないため、出場後に目的地を切り替えることは困難である。

²⁷ 特に式(47)の γ_k が正である管轄では、実際の出火件数よりも推定した出火件数の方が多くなりやすい。

²⁸ 例えば、(B) 一時待機では 15 分以降に発生した火災の多くが放任火災となる。

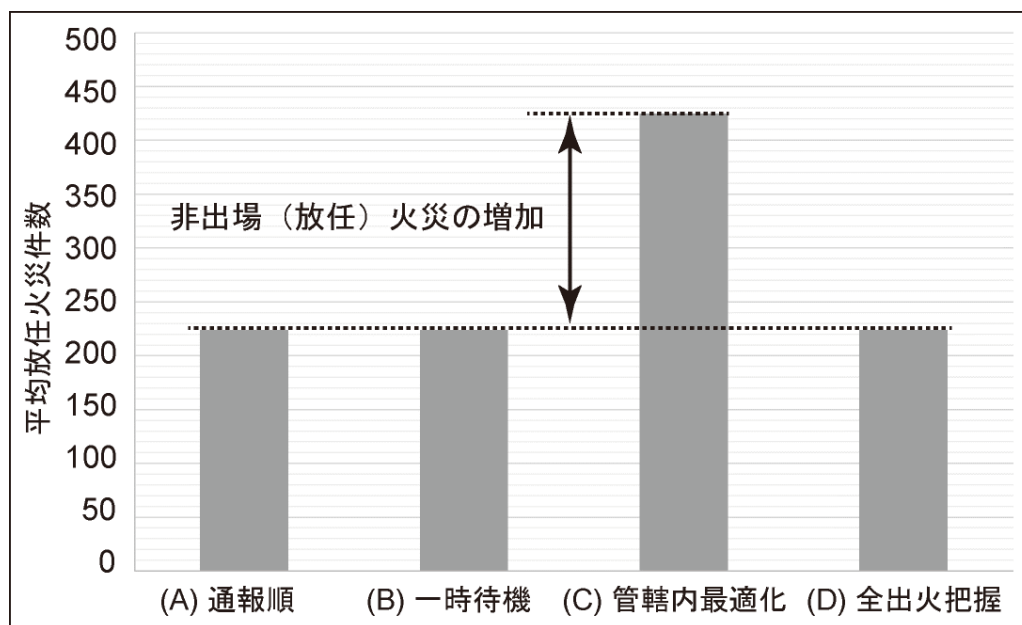


図 6.1.4-1 出場先決定戦略と平均放任火災数 (I) 閉塞なし, (II)閉塞あり 共通)*

*縦軸の値は「放任火災による焼失棟数」ではなく、「平均放任火災数（放任された火災件数）」を示していることに注意する。

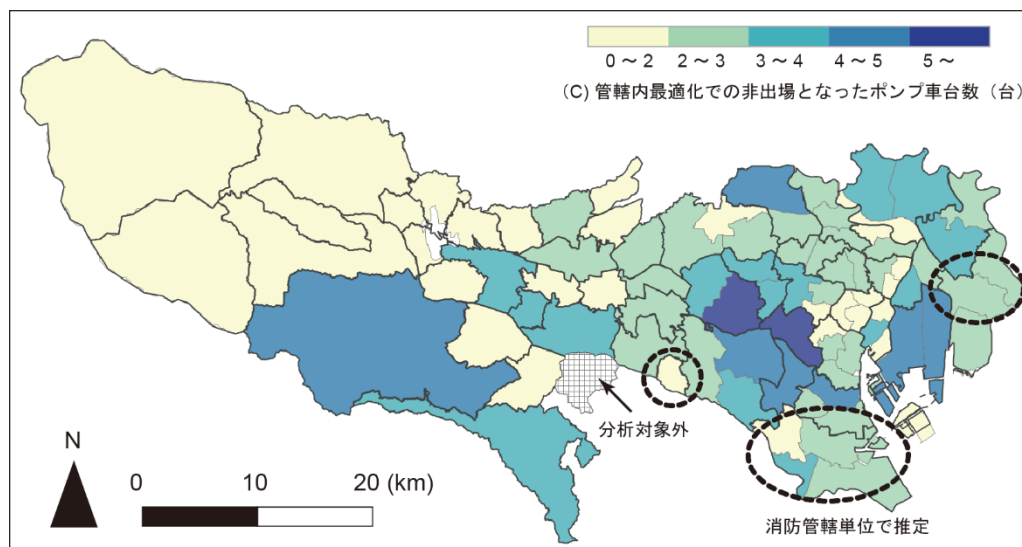


図 6.1.4-2 (C) 管轄内最適化での非出場となったポンプ車台数の空間分布*

*出火件数の方がポンプ車数よりも少ない場合にはポンプ車は出場できないため、必然的に残存することになる。この現象は、(C) 管轄内最適化以外の戦略でも同様であることから、この影響を排除するために、出火件数がポンプ車台数よりも多い場合の残存したポンプ車台数を「非出場となったポンプ車台数」として示している。

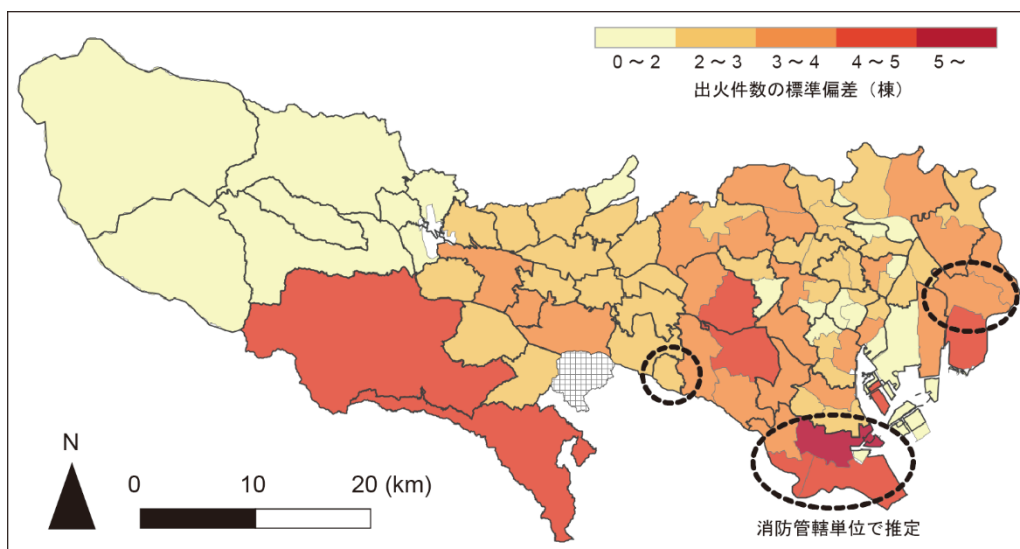


図 6.1.4-3 出火件数の標準偏差の空間分布

ここで、戦略(A)～(D)ごとの非出場（放任）火災による空間分布をみると（図 6.1.4-4～図 6.1.4-7），(C) 管轄内最適化で焼失棟数が大きい管轄（○で囲んである管轄等）では，残存ポンプ車台数（図 6.1.4-2）が小さいことが確認できる．すなわち，放任されている火災は，比較的小規模の火災であると考えられる．さらに，ポンプ車が残存しない戦略である(A) 通報順や(B) 一時待機では，東京都区部で 300 棟以上焼失させてしまう管轄が多い．

この結果は，(C) 管轄内最適化では，放任火災となる火災件数が上昇するという課題があるものの，放任されている火災による焼失棟数は大きくないため，“全体的な焼失棟数を低減させるという観点からみた場合のリスク”は小さいことを示している．

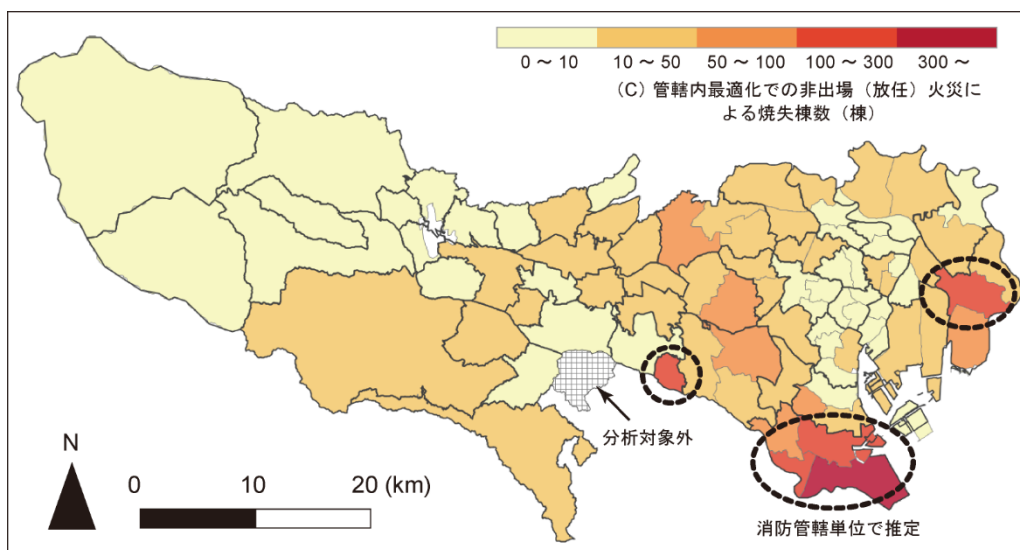


図 6.1.4-4 (C) 管轄内最適化での非出場（放任）火災による焼失棟数の空間分布

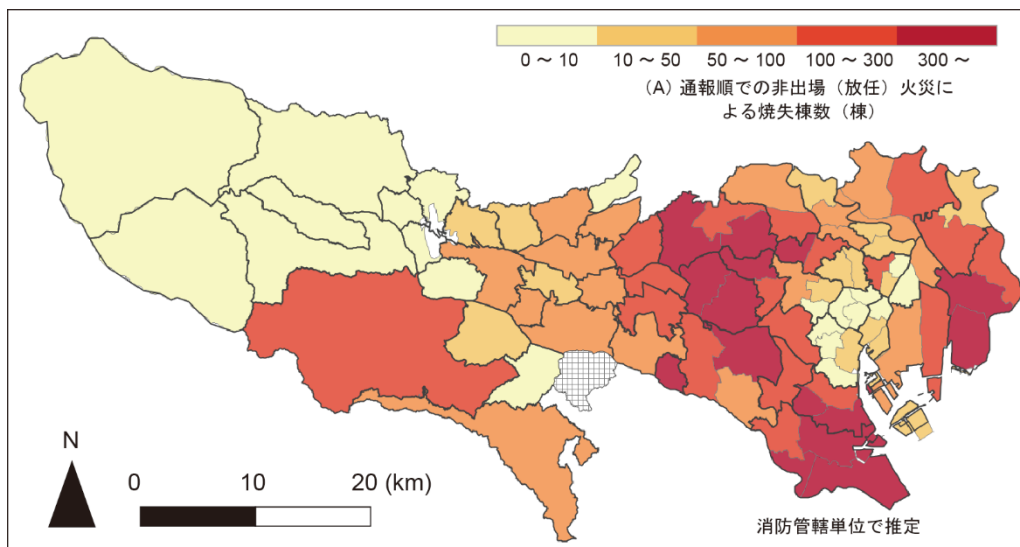


図 6.1.4-5 (A) 通報順での非出場（放任）火災による焼失棟数の空間分布

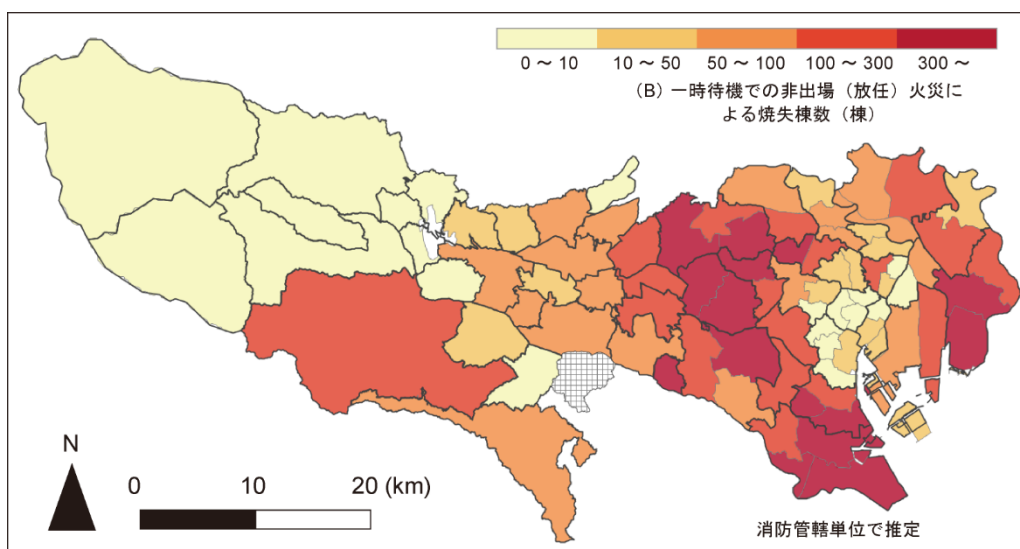


図 6.1.4-6 (B) 一時待機での非出場（放任）火災による焼失棟数の空間分布

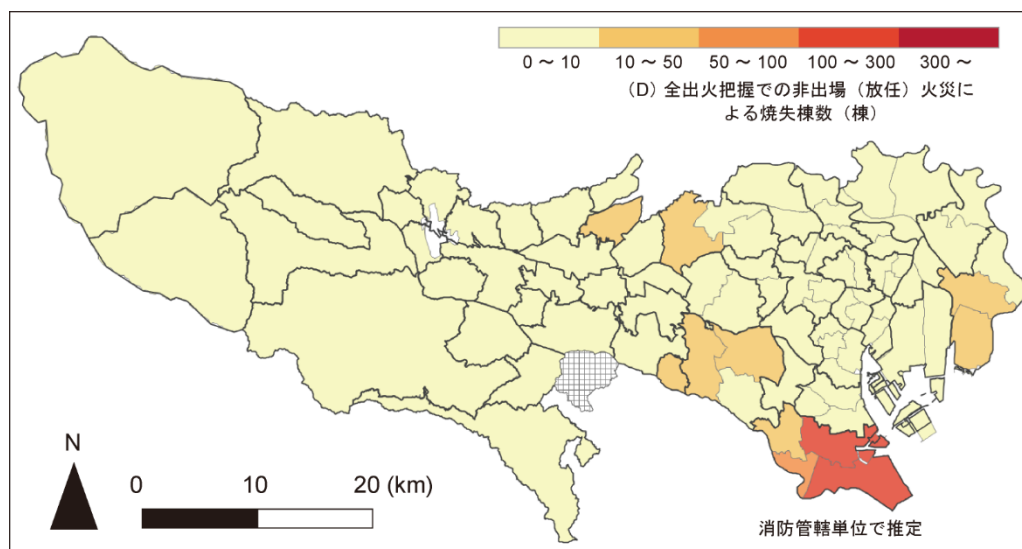


図 6.1.4-7 (D) 全出火把握での非出場（放任）火災による焼失棟数の空間分布

2. 地震規模に応じた戦略の有効性の検証

2.1 地震規模に応じた出場先決定戦略の検証を行う意義

前節では、延焼ポテンシャルと出火確率から、通報された火災の優先順位を推定することで、焼失棟数が大幅に低減できることを示した。しかし、地震規模が異なれば出火件数等が変化することで、(C) 管轄内最適化戦略で効果的に焼失棟数を低減できない可能性がある。例えば、地域ごとの安全率である γ_k (式(47)) が、M7.3 の地震に対して最適化されているため、異なる規模の地震が発生した場合に、出火件数が過大・過小に推定されてしまう可能性がある。他にも、延焼ポテンシャルは近傍から複数出火しない場合を想定した危険性指標であるため、出火件数の増加によりこの前提が崩れると、延焼する領域が重複することで優先順位を適切に推定できない可能性がある²⁹。

そこで、想定と異なる規模の地震が発生した場合における、各戦略の有効性について検証する。なお、想定する地震は、東京湾北部地震の震源位置はそのままに、モーメントマグニチュードを 0.5 増減した規模 (M6.8, および, M7.8) の地震を想定する。その他の条件は、第五章の条件と同様である。

2.2 異なる地震規模での被害状況の推定

図 6.2.2-1, 図 6.2.2-2 に、焼失棟数への影響の大きい指標である、平均道路閉塞率と平均出火件数を示してある (参考として、M6.3 と M8.3 の被害状況も示してある)。マグニチュードの増加に伴い、地震のエネルギーが指数的に増大するため、どちらの指標も指数的に増加していることが確認できる。道路閉塞率をみると、大規模地震時 (M7.8 や M8.3) には、それぞれ約 25% と約 40% の道路が閉塞するため、消防車両等による活動が大幅に制限される可能性が高い。次に平均出火件数をみると、小規模地震時 (M6.3 や M6.8) には、それぞれ約 100 件と約 250 件の出火件数であるのに対し、大規模地震時 (M7.8 や M8.3) には、そ

²⁹ N 件の火災が近接しており、それらの延焼領域が重複している場合、N 件の火災全てを鎮圧してはじめて、焼失棟数が低減可能となる。一方で、1 件でも鎮圧できなければ結局その領域が焼失してしまう。この現象により例えば、延焼ポテンシャルが比較的小さい火災であっても延焼領域が重複していない別の火災を N 件鎮圧した方が焼失棟数の低減効果が大きくなる可能性がある。

この問題は、延焼クラスタモデルのように延焼領域を近似した場合には、単純な 0-1 ナップサック問題 (ナップサックの容量と容積・価値が異なる品物集合が与えられたときに、ナップサックの容量制約のもとで価値を最大にする品物の組合せを求める問題) に近似できるため、動的計画法等を用いて解決することも可能となる。しかし、実際の延焼は異方性や炎上領域の拡大に伴う加速効果があるため、延焼領域の重複現象が複雑となり、このような手法は適用できない。さらに、延焼クラスタモデルを用いてこの問題に対応した場合には、現状の想定 (M7.3) で焼失棟数の低減効果が小さくなる可能性がある。

れぞれ約 2500 件と約 6,000 件の建物から出火すると推定されており、すべての火災を鎮圧するのは不可能と考えられる。

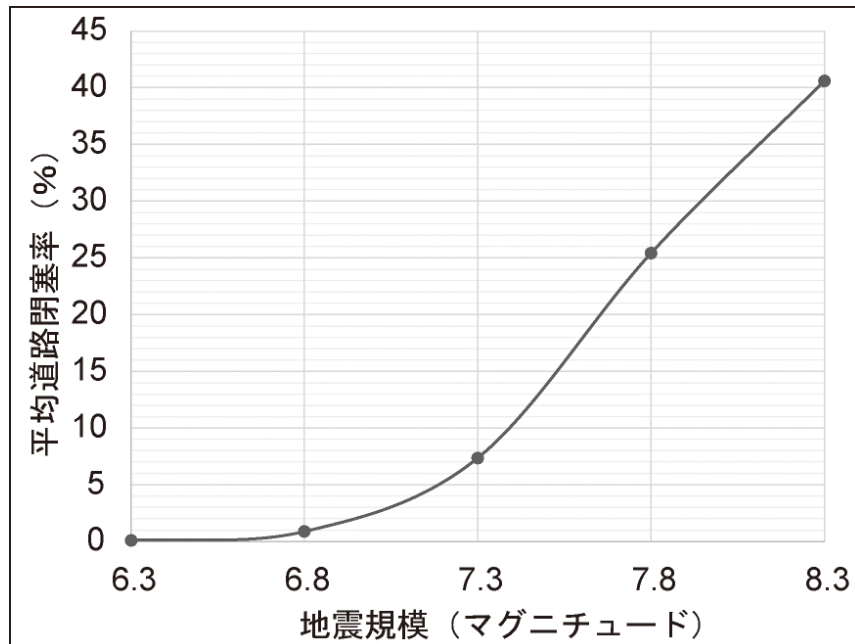


図 6.2.2-1 地震規模による平均道路閉塞率の推移（東京都全域での平均、車両閉塞）

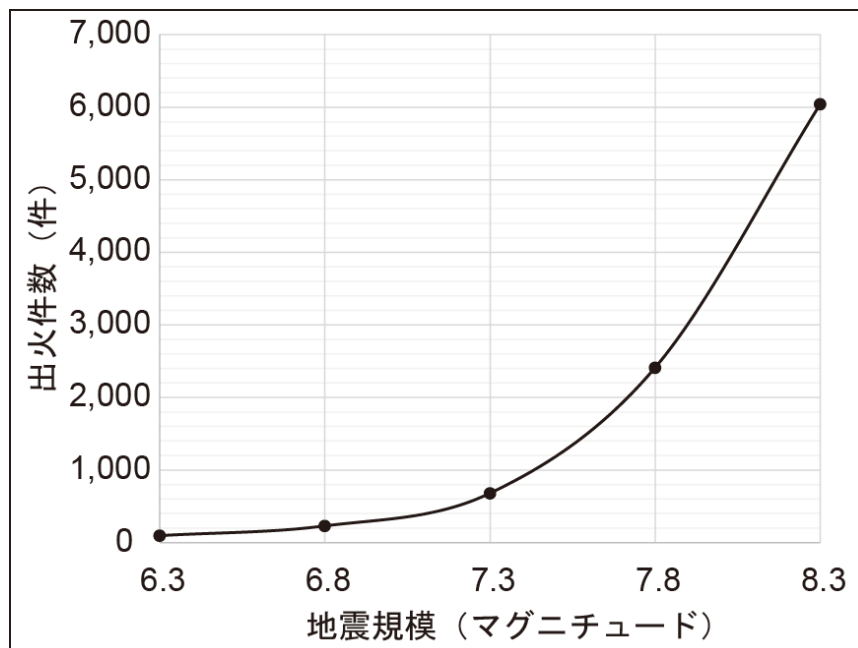


図 6.2.2-2 地震規模による平均出火件数の推移（東京都全域での合計値）

2.3 地震規模による焼失棟数への影響

M6.8 のように出火件数が少ない場合（図 6.2.2-2）には、出火した火災のほぼ全てに出場できること³⁰や、延焼危険性の高い建物からの出火件数も少なくなる³¹ため、すべての戦略で非出場（放任）火災による焼失棟数は少なくなる（図 6.2.3-1）。それに伴い、(B) 一時待機と(C) 管轄内最適化の非出場（放任）火災による焼失棟数の差は、約 100 棟程度と小さくなる。

しかし、図 6.2.3-2 によると、(B) 一時待機でのみ、延焼阻止失敗による焼失棟数が大幅に増加してしまっていることがわかる。これは、15 分間の待機中に延焼が進み、延焼阻止失敗となる場合があることに起因する。すなわち、小規模地震時ほど、一時待機することなく直ちに出場することが望ましい。一方、M7.3 の地震時に、ポンプ車が残存する場合は存在した (C) 管轄内最適化であるが、出火件数の推定値に応じて自動的に即時出場基準が変更される³²ため、小規模火災の場合であっても、放任火災が増加するリスクは少ない。

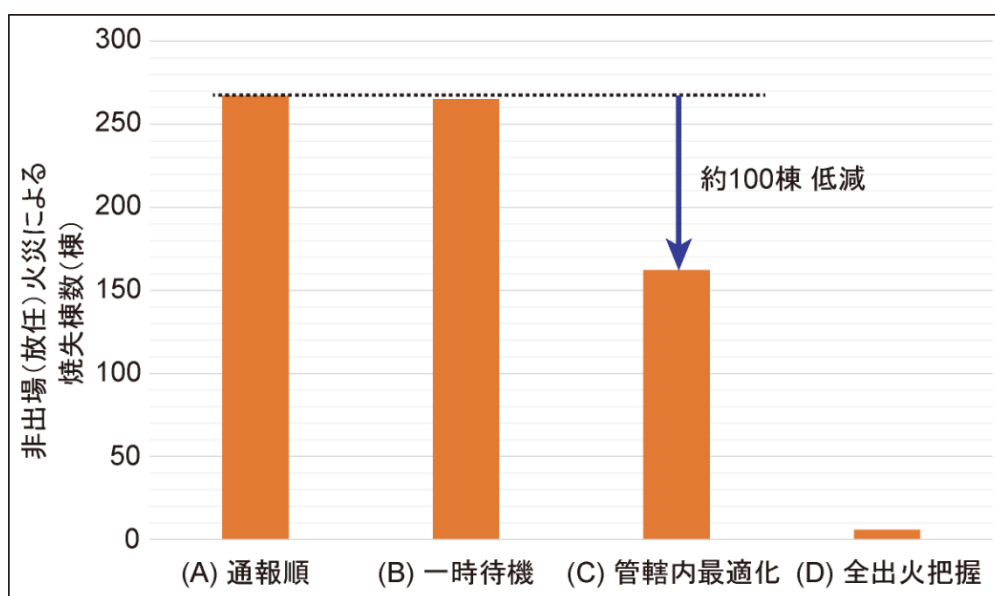


図 6.2.3-1 各戦略での非出場（放任）火災による
焼失棟数 (II) 閉塞あり，M6.8

³⁰ 空間的な偏りがあるため、すべての火災に出場できるわけではない。

³¹ 出火割合は同程度であると考えられるが、出火件数としては少なくなる。

³² 延焼ポテンシャルは、先述のように工学的基盤に一律 30cm/sec の想定での値を用いるため、発災後に推定する必要はない。

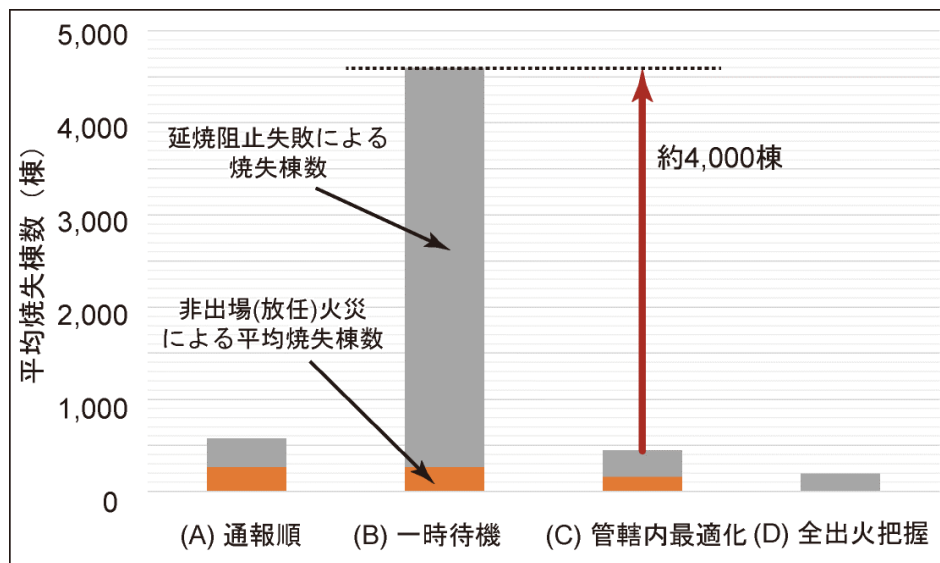


図 6.2.3-2 各戦略での平均焼失棟数 (II) 閉塞あり, M6.8

大規模地震時 (M7.8) の焼失棟数の特徴として, (B) 一時待機と (A) 通報順の非出場 (放任) 火災による焼失棟数の差が拡大していることが挙げられる (図 6.2.3-3). これは, 出火件数が増加することで 15 分間の通報件数が増加し, 出場先の選択肢が増加したことによるものと推察される. また, 総焼失棟数をみると, (A) 通報順での延焼阻止失敗による焼失棟数が他の戦略と比較して相対的に小さくなっていることもわかる (図 6.2.3-4). この現象も出火件数が多くなることで, (A) で出場する火災と, (C) や (D) で出場する火災の平均的な延焼危険性の差が大きくなり, 結果的に延焼阻止に失敗した場合の焼失棟数にも差が生じ始めたものと考えられる³³.

大規模地震であっても, (C) 管轄内最適化は, (A) 通報順や (B) 一時待機と比較して焼失棟数の低減効果が最も大きいことが確認できる (約 40%, 約 56,000 棟の低減効果). 東京都全域でみると約 2,500 件の火災が発生しているが, 建物総数 (約 300 万棟) に対しては 9% 程度であるため, 近傍から複数出火する割合も低く, 実用的には延焼ポテンシャルで十分に優先順位を推定できているものと推察される. また, γ_k に関しては, M6.8・M7.8 とともに, (C) 管轄内最適化と (D) 全出火把握との焼失棟数の差が大きくなっていることから, 発災直後に適切な γ_k を探索できれば焼失棟数をさらに低減できる可能性がある. しかし, γ_k の最適化には時間を要することから, 発災直後に行うことは困難であるため, 地震規模ごとの γ_k の推定は行わない.

以上の結果から地震規模が異なったとしても, (C) 管轄内最適化では, 自動的に即時出場基準が変更されるため, 焼失棟数を低減するという観点からは, (A)~(C) の戦略の中で最も有効であることが確認できた.

³³ どちらの戦略も即時出場のみであり, 延焼速度にも大きな差は生じないと考えられる. しかし, 木造密集地域等では, 延焼危険性だけでなく道路閉塞率も高いため, 延焼阻止に失敗しやすくなっている可能性はある.

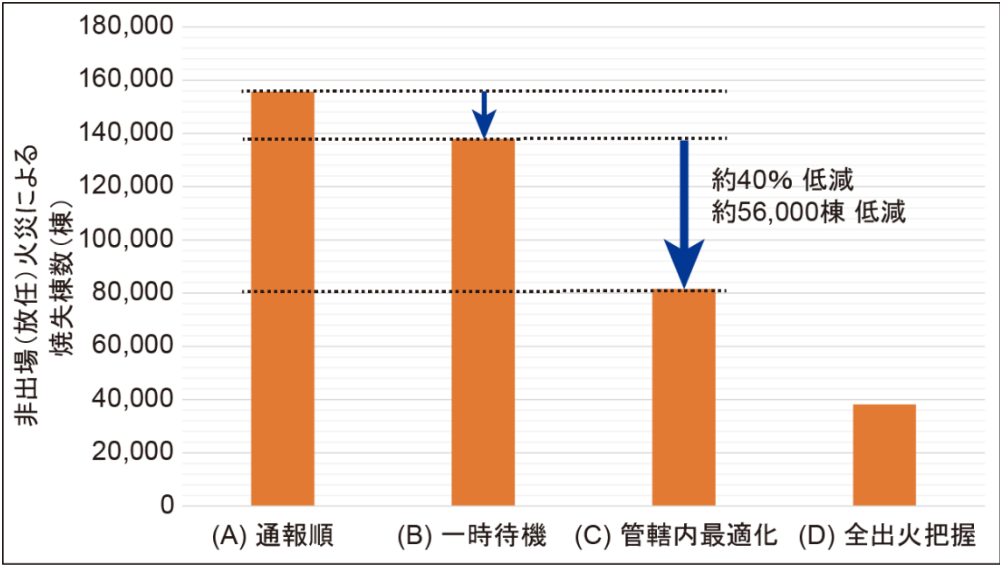


図 6.2.3-3 各戦略での非出場（放任）火災による
焼失棟数 (II) 閉塞あり, M7.8

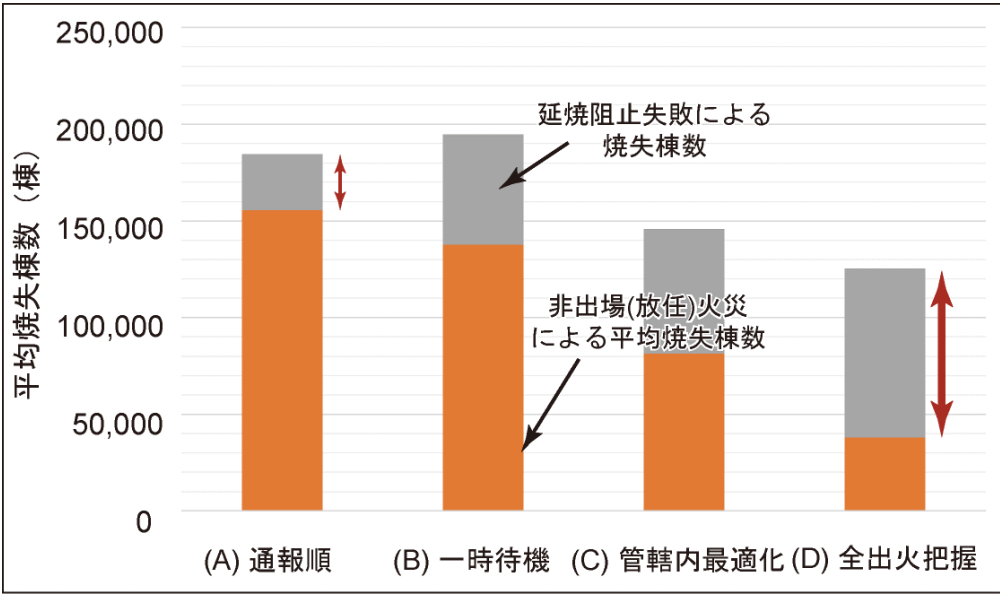


図 6.2.3-4 各戦略での平均焼失棟数 (II) 閉塞あり, M7.8

3. 通報情報の位置情報誤差に関する検証

3.1 位置情報誤差の概要

前節では、異なる規模の地震が発生した際の各出場先決定戦略の有効性を検証し、提案手法（(C) 管轄内最適化）が地震規模によらず、他の戦略よりも効果的に焼失棟数を低減できることを示した。一方で、(A) 通報順以外の全ての出場先決定戦略では、通報された建物の情報（延焼ポテンシャルや所属する震災出場区）を利用して、その火災の優先度を決定している。すなわち、入手した位置情報等の信頼性が低い等の理由で、出火建物を正しく特定できなかった場合には出場判断を誤る可能性がある。そして、大地震時の混乱した状況下では、入手した情報がすべて正確とは限らない。例えば、通報された位置情報が出火建物の正確な住所や緯度経度ではなく、ランドマークを頼りにしたような情報（駅の近く等）である場合には、出火建物の延焼危険性の判断を誤る可能性がある。

そこで、本節では、出火建物と通報された建物の位置がずれており、実際の出火建物ではなく、通報されたと誤って認識した建物（通報建物）の延焼ポテンシャルに基づいて出場先を決定してしまった場合の影響について検討する。具体的にはまず、第五章での条件のもとで市街地被害シミュレーションを行い、1,000 ケースの異なる出火延焼状況を作成する。出火建物と通報された建物（通報建物）の位置情報のずれ幅（位置情報誤差）は、出火建物を中心に 5m から 100m まで 5m ずつ変化させる。その際、一様乱数を用いて出火建物の位置を変更する（図 6.3.1-1）。位置情報誤差の影響のみを比較しやすくするため、出場先決定戦略は、(D) 全出火把握のみとし、1,000 回のモンテカルロシミュレーションにより、非出場（放任）火災による平均焼失棟数の平均値を推定する³⁴。ただし、ここで想定している位置情報誤差は、最大でも 100m³⁵[48]であることから、通報位置がずれていたとしても最終的には実際の出火建物へ出場できるものと仮定して焼失棟数を推定する。

³⁴ これまでの分析結果（図 6.1.3-2 や図 6.1.3-3）からもわかるとおり、M7.3 規模の地震において即時出場のみを行う場合（(A), (C), (D)）には、延焼阻止失敗に起因する焼失棟数に差は見られないことから、非出場（放任）による焼失棟数のみに着目しても、判断を誤る可能性は低い。

³⁵ 大佛・沖[48]の情報収集に関する実証実験では、誤情報と判定された情報における位置のずれは、平均で 10m、最大でも 65m 程度であったことから、位置情報誤差は 100m 以上にはならないものとした。



図 6.3.1-1 位置情報誤差を伴う場合の出場先決定例

3.2 位置情報誤差が焼失棟数へ及ぼす影響

図 6.3.2-1 に、(D) 全出火把握での非出場（放任）火災による焼失棟数の空間分布を示している。また、図 6.3.2-2、図 6.3.2-3 に、位置情報誤差が 10m、65m[48]の場合の、位置情報誤差がない場合からの平均焼失棟数の増加量の空間分布を示している。

(D) 全出火把握では、多くの管轄で焼失棟数を 10 棟以下にまで低減できていることがわかる。区部と市部を比較すると、位置情報誤差による焼失棟数への影響が大きく異なっていることが判明した。具体的には、位置情報誤差が 10m の場合、区部では、平均焼失棟数が 100 棟以上増加する地域があるのに対し、市部では、ほぼすべての地域で 10 棟以下の増加に留まっている。これは、建物密度（単位面積当たりの建物数）の差異によると考えら

れる（図 6.3.2-4）。すなわち、1 棟あたりの建築面積が大きく、空地率も高い市部では、位置情報が 10m 程度ずれることの影響は無視できるほどに小さい。一方、耐火造建物に隣接して木造建物が存在する等、狭い範囲に防火・耐火性能の異なる建物が乱立している区部では、平均焼失棟数に 100 棟以上の差が生じるような管轄も存在する。実際、各管轄の平均焼失棟数の増加量と不燃建物割合をみると（図 6.3.2-5）、平均焼失棟数の増加量が大きい管轄は、不燃建物割合が 30～40% 程度であり、防火・耐火性能の異なる建物が混在していることがわかる。また、出火建物の位置情報誤差が 65m の場合には、位置情報誤差がない場合と比較して、200 棟以上平均焼失棟数が増加する管轄も見受けられる。このように、位置情報誤差の影響の大きい区部では、入手した位置情報に関して、よりいっそう注意を払う必要がある。

最後に、全域での焼失棟数をみてみると、位置情報誤差が 5m を超えたところから急激に焼失棟数が増加していることがわかる。さらに、位置情報誤差が 10m のときであっても、焼失棟数は位置情報誤差がない場合の 2 倍以上であり、位置情報誤差が 65m のときには、位置情報誤差がない場合の 7 倍以上にも及ぶ（図 6.3.2-6）。

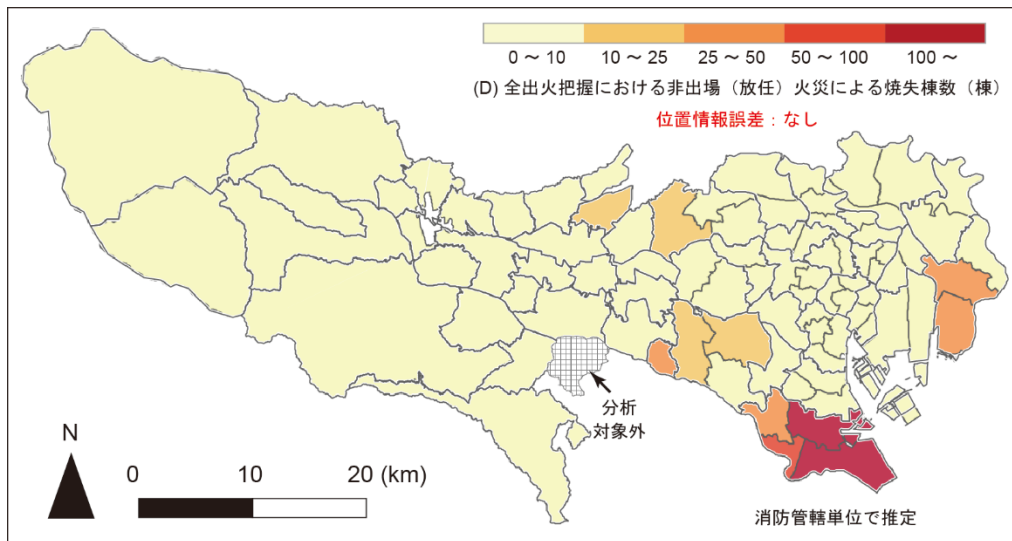


図 6.3.2-1 (D) 全出火把握における非出場（放任）火災による焼失棟数
(位置情報誤差：なし)

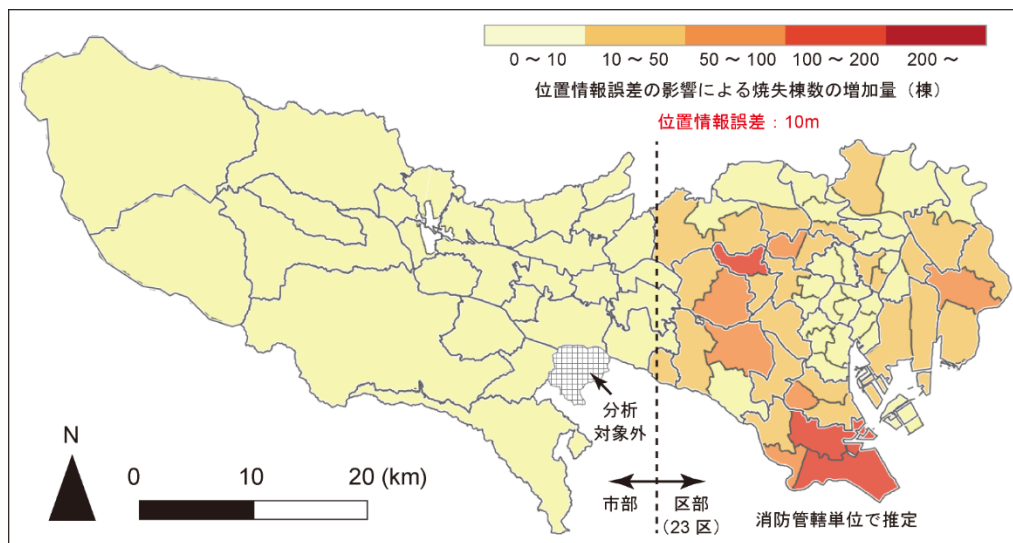


図 6.3.2-2 位置情報誤差が非出場（放任）火災による焼失棟数へ及ぼす影響
 （【位置情報誤差あり】－【位置情報誤差なし】）
 （位置情報誤差：10m）＊

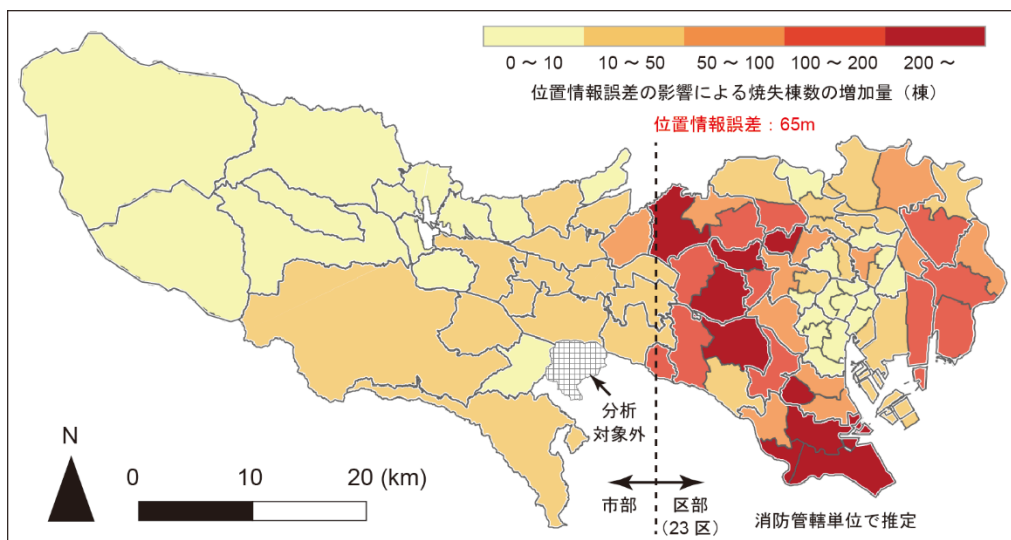


図 6.3.2-3 位置情報誤差が非出場（放任）火災による焼失棟数へ及ぼす影響
 （【位置情報誤差あり】－【位置情報誤差なし】）
 （位置情報誤差：65m）＊

＊大佛・沖[48]の情報収集に関する実証実験における，位置情報誤差の平均値（10m），最大値（65m）の場合の空間分布を示している。

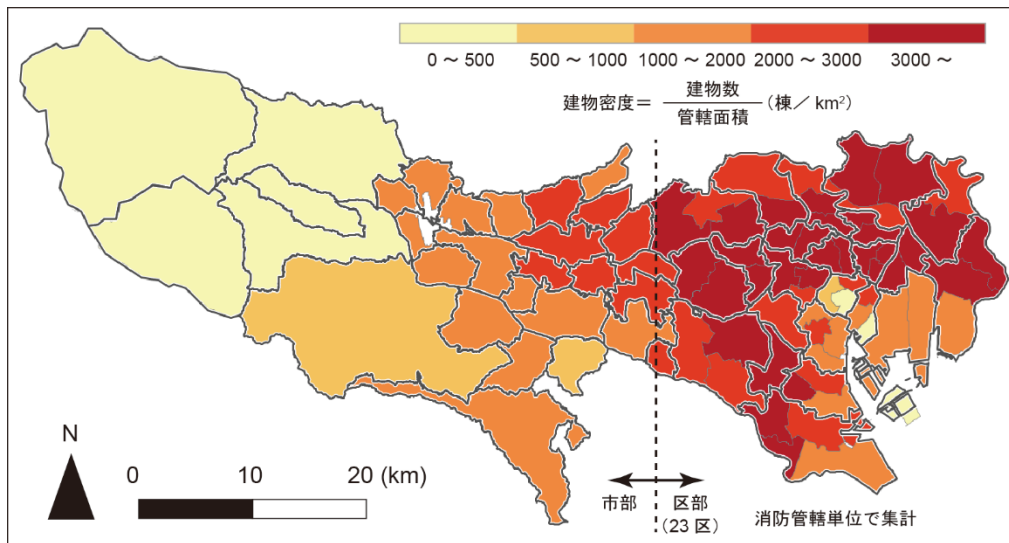


図 6.3.2-4 東京都区部と市部での建物密度の差異

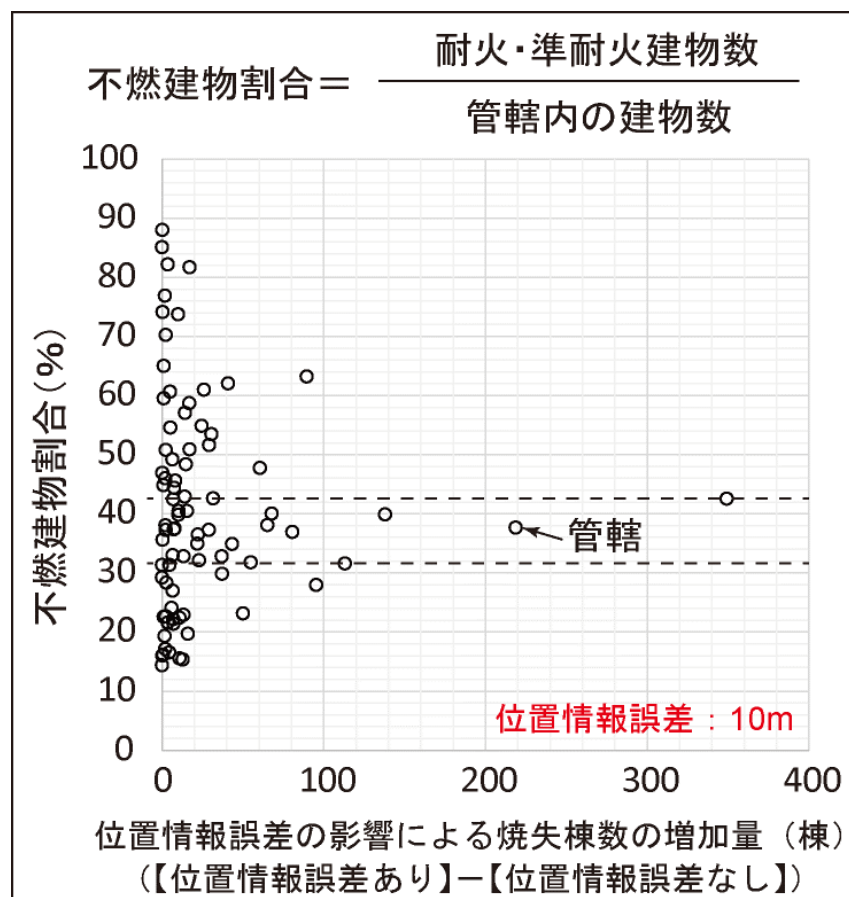


図 6.3.2-5 不燃建物割合と非出場（放任）火災による焼失棟数の増加量との関係

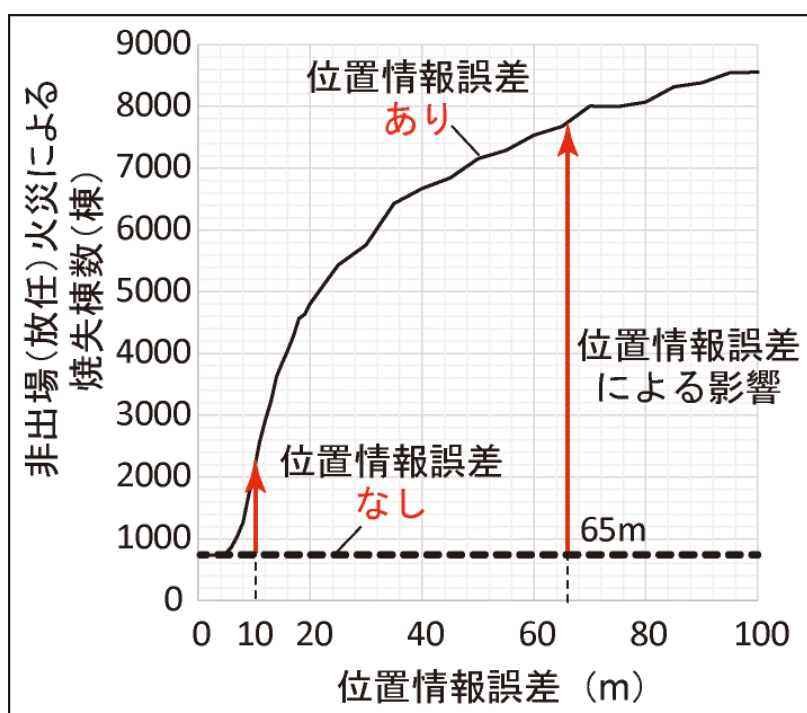


図 6.3.2-6 位置情報誤差と非出場（放任）火災による焼失棟数との関係

3.3 平均延焼ポテンシャルの利用による焼失棟数の低減効果

通報建物の位置情報に誤差を伴う場合、焼失棟数の増加に及ぼす影響は無視できない。そこで、通報建物の位置情報に誤差を伴う場合への対策として、通報建物単体の延焼ポテンシャルではなく、通報建物の周辺に存在する建物による延焼ポテンシャルの平均値（平均延焼ポテンシャル）に基づき出場先を決定した場合の、焼失棟数の低減効果について検討する（図 6.3.3-1）。具体的には、通報建物から一定範囲（25m, 50m, 75m）内の平均延焼ポテンシャルを算出し、この値が高い通報建物へ出場するものとする。

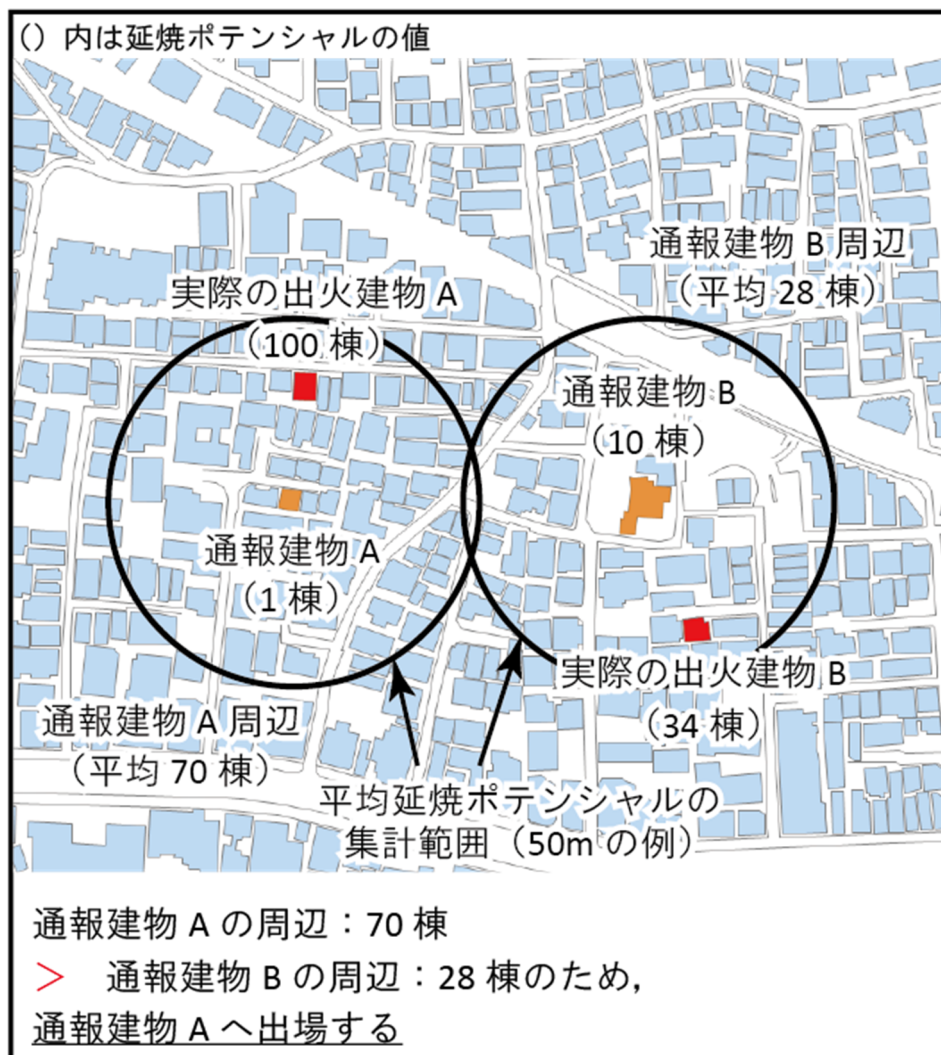


図 6.3.3-1 平均延焼ポテンシャルに基づく出場先決定例

平均延焼ポテンシャルの集計範囲が 75m のときの焼失棟数低減効果の空間分布（位置情報誤差：10m および 65m）を図 6.3.3-2，図 6.3.3-3 に示してある。位置情報誤差が 10m 程度の場合は，平均延焼ポテンシャルではなく，建物単体の延焼ポテンシャルに基づき出場先を決定した方が，ほとんどの管轄で最終的な焼失棟数を低減できることが判明した。しかし，位置情報誤差が 65m になると，平均延焼ポテンシャルに基づき出場先を決定することで，すべての管轄で焼失棟数を低減でき，特に位置情報誤差の影響が大きかった 23 区西部では，200 棟以上焼失棟数を低減できる可能性が高い。

図 6.3.3-4，図 6.3.3-4'に，平均延焼ポテンシャルの集計範囲が 25m，50m，75m の際の非出場（放任）火災による焼失棟数と位置情報誤差との関係（東京都全域での合計値）を示してある。位置情報誤差が約 10m を超えると，通報建物単体の延焼ポテンシャルに基づき

行動した場合と、平均延焼ポテンシャル（75m 以内の平均）に基づき行動した場合の焼失棟数の順位が逆転している（図 6.3.3-4'）。すなわち、出火建物の位置情報が住所等で正確に把握可能な状況であれば、通報建物の延焼ポテンシャルに基づき出場先を決定したほうがよいが、わずかでも位置情報の精度に不安が残るのであれば、平均延焼ポテンシャルに基づき出場先を決定した方が、焼失棟数の低減効果が大きくなることが期待できる。また、100m 程度の位置情報誤差があったとしても、平均延焼ポテンシャルに基づき出場先を決定した場合は、焼失棟数の増加が少なく、建物単体の延焼ポテンシャルを用いる場合の半分以下となる可能性が高い。これは、ランドマークを頼りにした通報等、位置情報誤差の程度が判断できない場合においては、平均延焼ポテンシャルに基づき出場する方法が有効であることを示唆している。しかし、平均延焼ポテンシャルに基づく出場先決定戦略は、位置情報誤差が小さい場合には、位置情報誤差がない場合の約 3 倍の焼失棟数となる危険性もあるため、状況に応じて柔軟に対応する必要があると考えられる。

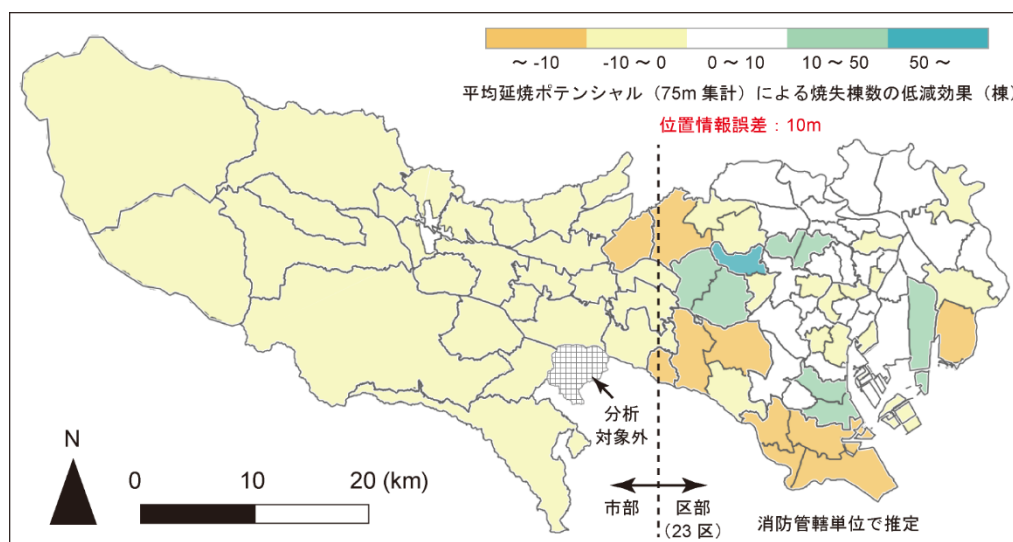


図 6.3.3-2 平均延焼ポテンシャル（75m 集計）の
非出場（放任）火災による焼失棟数の低減効果（位置情報誤差：10m）
（【建物単体の延焼ポテンシャル】－【平均延焼ポテンシャル】）

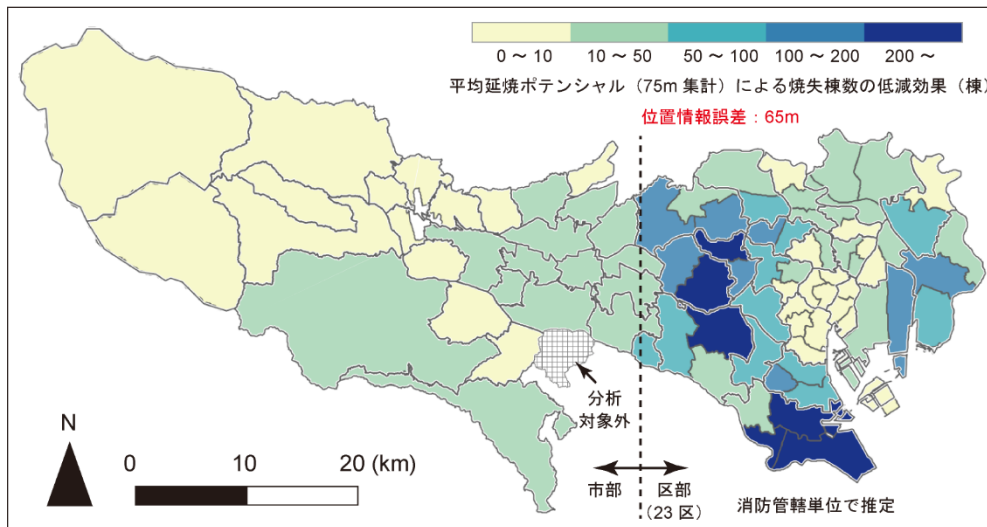


図 6.3.3-3 平均延焼ポテンシャル（75m 集計）の
非出場（放任）火災による焼失棟数の低減効果（位置情報誤差：65m）
（【建物単体の延焼ポテンシャル】－【平均延焼ポテンシャル】）

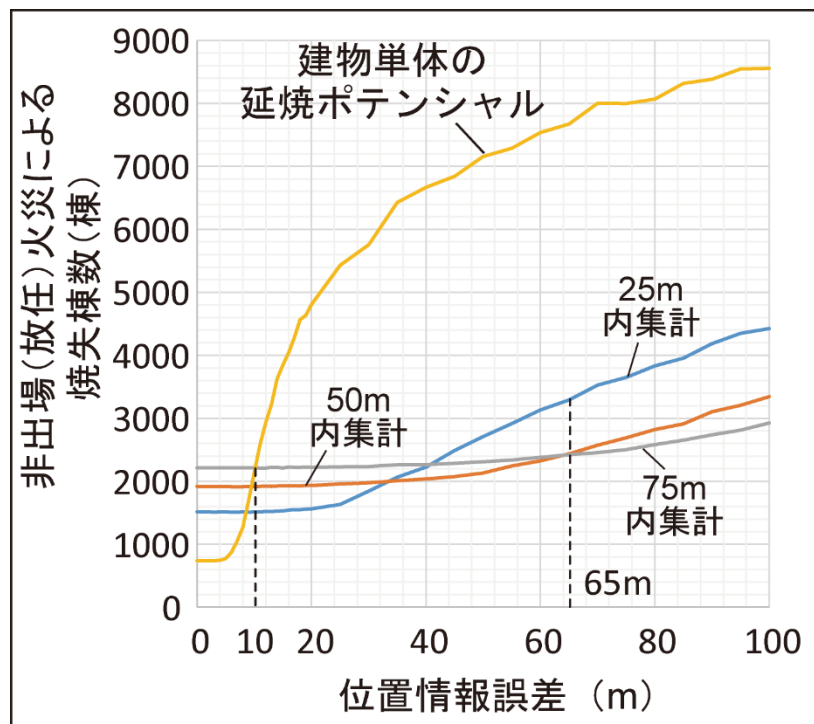


図 6.3.3-4 位置情報誤差と平均延焼ポテンシャルによる
非出場（放任）火災による焼失棟数との関係

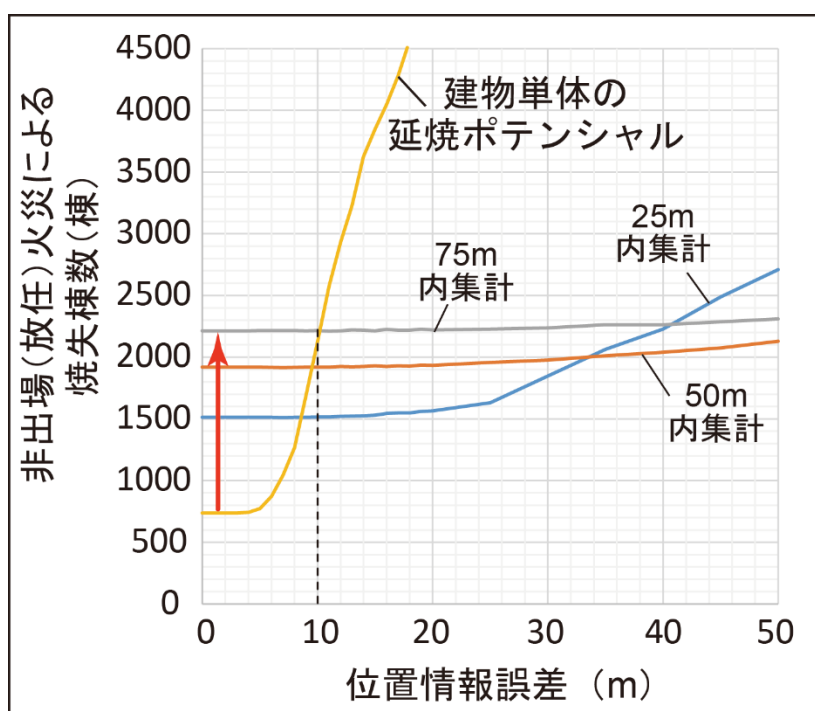


図 6.3.3-4' 位置情報誤差と平均延焼ポテンシャルによる
非出場（放任）火災による焼失棟数との関係（拡大）

4. 第六章のまとめ

第六章では、出場先決定戦略と焼失棟数との関係性について分析を行った。従来までの出場先決定戦略の代表である、発災から一定時間待機し危険な火災の発生に備える戦略（一時待機戦略）では、延焼危険性情報を一切使用しない通報順戦略と比較しても低減効果は小さい。この結果は、待機時間以降に発生する延焼危険性の高い火災が、焼失棟数へ及ぼす影響が大きいことを示唆している。加えて、待機中に延焼が進行することで、延焼阻止失敗に起因する焼失棟数が上昇してしまう可能性もある。一方で、本研究で提案する、延焼ポテンシャルと出火確率に基づき通報された火災の、未知の全火災集合における延焼危険性順位を予測する戦略（管轄内最適化戦略）では、一時待機戦略と比較して焼失棟数を約 85%低減できることを示した。この戦略では、延焼危険性の高い火災を覚知した際に、即時出場可能であるため、延焼阻止に失敗する可能性も低い。さらに、現実的な下限値となる全知を想定した全出火把握戦略との焼失棟数の差も小さいことが判明した。

しかし、地震規模が異なれば出火件数等が変化するため、管轄内最適化戦略で効果的に焼失棟数を低減できない可能性がある。そこで、想定と異なる規模の地震が発生した際のシミュレーション実験を行い、管轄内最適化戦略の安全性に関する検証を行った。シミュ

レーション結果に基づくと、地震規模が小さい場合には、空間的な偏りはあるが、ほぼすべての火災に出場できることや、延焼危険性が大きい建物からの出火件数が減少するため、非出場（放任）火災による焼失棟数は全体的に低い。しかし、一時待機戦略の場合には、待機時間内に得られる情報が減少することに加え、待機中に延焼が進行することで、延焼阻止に失敗する場合があることに注意する。管轄内最適化戦略では、地震規模にあわせて即座に出火確率を推定し、自動的に即時出場基準が変更されるため、焼失棟数が増加するリスクは少ない。大規模地震の場合には、管轄内最適化と全出火把握との焼失棟数の差は大きくなるものの、一時待機戦略と比較して焼失棟数を約 40%低減できることが判明した。すなわち、現実的な地震規模（M6.8～M7.8）に限れば、管轄内最適化戦略は有効に機能することが確認された。

また、出場先決定では、通報された建物の延焼危険性情報（延焼ポテンシャル等）に基づき出場先を決定している。そこで、第六章の最後では、通報された位置情報に誤差を含む場合の検証を行った。例えば、ランドマークを頼りにした情報等のように、位置情報に不確実性を含む場合に、建物単体の延焼ポテンシャルに基づき出場先を決定してしまうと、非出場（放任）火災による焼失棟数が約 7 倍となる可能性が判明した（位置情報誤差が 65m の場合）。このように、位置情報の精度に不安が残る場合には、通報建物の周辺の延焼ポテンシャルを平均した値である、平均延焼ポテンシャルに基づき出場先を決定すると、焼失棟数の増加を抑えられる可能性が高い。一方で、位置情報誤差が小さい場合に、平均延焼ポテンシャルに基づき出場すると、建物単体の延焼ポテンシャルに基づき出場した場合と比較して、焼失棟数が約 3 倍となる可能性がある。すなわち、位置情報の精度に従い柔軟に対応する必要があることが判明した。

ただし、提案手法である管轄内最適化戦略では、平均的な焼失棟数を大幅に低減できる反面、最後まで一部のポンプ車が出場しない可能性もある。これは、出火確率が人間の行動等に依存するため、不確実性が高く推定精度が安定しないことに起因している。そのため、危険性の高い建物集合からの出火件数を過大に推定する傾向にあり、実際の出火件数が推定値よりも少ない場合に、一部のポンプ車が残存してしまうのである。この問題は、想定よりも小規模な火災の発生件数が多い場合に顕著であるため、平均的な焼失棟数（や相関関係にあると考えられる平均的な人的被害等）を低減するという観点からは、大きな問題とはならないと考えられるが、建物内のセンサー情報や高所カメラ等を用いて、出火現象の予測精度を向上させることは今後の課題であると考えている。

第七章

消防隊移動支援と延焼阻止との関係

1. 消防隊の移動支援の概要

第六章では、出場先決定戦略により変化する非出場（放任）火災に起因する焼失棟数に着目して分析を行った。一方で、大地震時には出火や延焼だけでなく、道路閉塞等の市街地被害が発生しているため、火災現場までの移動も容易ではない。また、大地震時の消防運用方針（2口放水によるホースの長さ）を考慮すると利用可能な防火水槽等も少なく、消防水利を経由した移動距離が増加する可能性もある。このような理由により、火災現場へ到着が遅れ、延焼が進行してしまうと、消防隊が延焼阻止に失敗する可能性（限界到着時間以内に到着できない可能性）が高くなる。このことは、たとえ延焼危険性の高い火災へ出場できたとしても、延焼阻止に失敗することで焼失棟数を低減できなくなる可能性を示唆している。

そこで、第七章では、消防隊の移動を支援することによる、延焼阻止失敗に起因する焼失棟数の低減効果について分析する。具体的には、①道路閉塞が消防隊の移動時間に及ぼす影響と、道路閉塞情報収集による経路探索支援の効果の検証、②断水状況下で消火栓を利用した場合における、移動距離の短縮による焼失棟数の低減効果の検証を行う。

2. 道路閉塞が消防隊の移動に及ぼす影響

2.1 消防隊の移動時間短縮の重要性

大地震時の建物倒壊に伴う道路閉塞は深刻な問題であり、(C) 管轄内最適化における延焼阻止失敗に起因する焼失棟数は、(II) 閉塞ありの場合に(I) 閉塞なしの場合の7倍以上（約6,700棟の増加）となっている（図 6.1.3-2, 図 6.1.3-3）。このとき、重要な道路が閉塞していない場合や、はじめから閉塞箇所を把握しており、適切な迂回路を利用可能である場合等には、消防隊の火災現場までの移動が効率化されることで、延焼阻止失敗による焼失棟数を低減できる可能性がある。

そこで、(I) 閉塞なし、(II) 閉塞ありに加え、下記の(III) 緊急輸送道路の沿道建物整備済み、(IV) 閉塞把握を含めた4つの道路状況を想定したシミュレーション実験を行い、消防隊の移動時間や延焼阻止失敗による焼失棟数を分析する。まず、市街地被害シミュレーションを第五章の条件で実行し、1,000ケースの異なる市街地被害状況（建物倒壊・道路閉塞・出火延焼）を作成する。出場先の決定には、第六章の分析で最も効果的であった(C) 管轄内最適化戦略を用いる。さらに既往研究[3,6]に倣い、消火栓は利用しないことを想定する。以上の条件で同一の市街地被害ケースを用いる限り、非出場（放任）火災による焼失棟数は変化しないため、ここでは、延焼阻止失敗による焼失棟数にのみ着目する。

(III) 緊急輸送道路の沿道建物整備済み

東京都が推進[2]している特定緊急輸送道路だけでなく、すべての緊急輸送道路の沿道建築物が耐震化され、緊急輸送道路が一切閉塞しなくなった想定である。

(IV) 閉塞把握

早期災害情報収集システム[48]等により、消防隊が出動する時点で閉塞している全ての道路閉塞を把握でき、はじめから道路閉塞を避けた経路を探索できる想定である。道路閉塞状況下での消防隊の移動時間の下限となるため、参考値として利用する。

2.2 道路閉塞が移動時間・焼失棟数へ与える影響

まず、(I) 閉塞なしの条件で推定された移動時間は、東京都のほぼ全ての管轄で 10 分以内であるため、移動時間の推定値として妥当であると考えられる（図 7.2.2-1）³⁶。また、最大移動時間をみても、15 分以下の管轄が多く、道路閉塞がない場合には延焼阻止に失敗する可能性が極めて低いことがわかる（図 7.2.2-3）。しかし、(II) 閉塞ありの状況では、到着までに 7 分程度要する管轄が多く、10 分程度要する管轄も複数見られる（図 7.2.2-2）。また、最大移動時間が 15 分を超える管轄も多く存在している（図 7.2.2-4）。このような管轄では、延焼阻止が困難となる可能性が高いことから、火災現場までの移動を支援する必要性が高い。本研究では、一般車両や避難者等による道路混雑の影響や、路上に駐車（放置）された車両による通行不能道路の影響を考慮していない³⁷ことから、実際の到着はさらに遅れるものと考えられる。

³⁶ 例えば、救急車が現場へ到着するまでの時間は平均で 7～8 分程度とされている。

³⁷ 通行速度を低減する程度の考慮に留まっている。

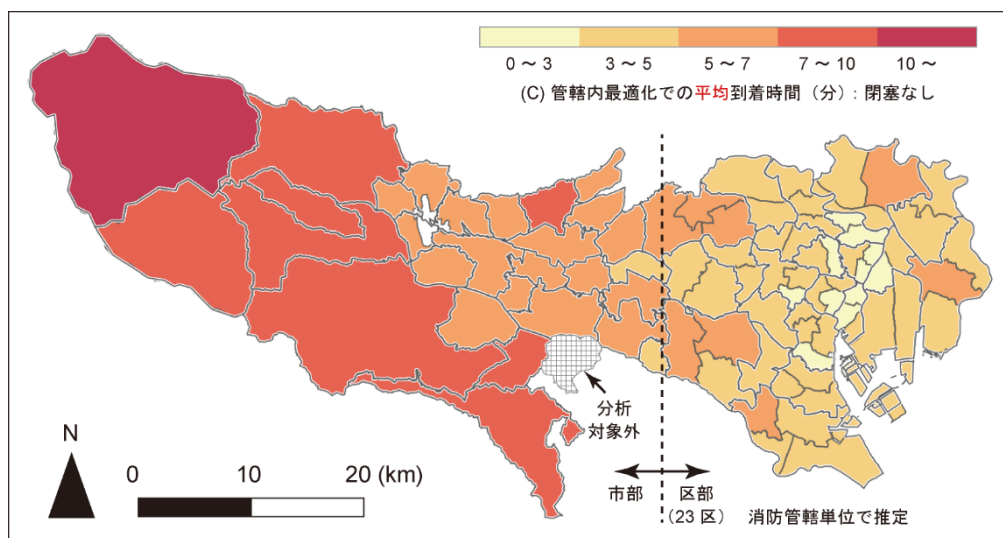


図 7.2.2-1 (C) 管轄内最適化での(I) 閉塞なしにおける
平均到着時間の空間分布

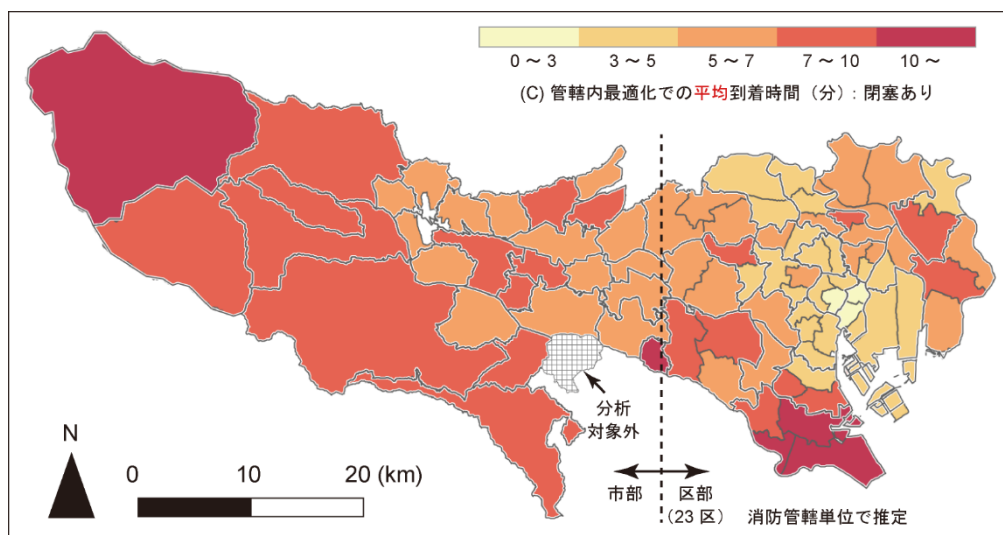


図 7.2.2-2 (C) 管轄内最適化での(II) 閉塞ありにおける
平均到着時間の空間分布

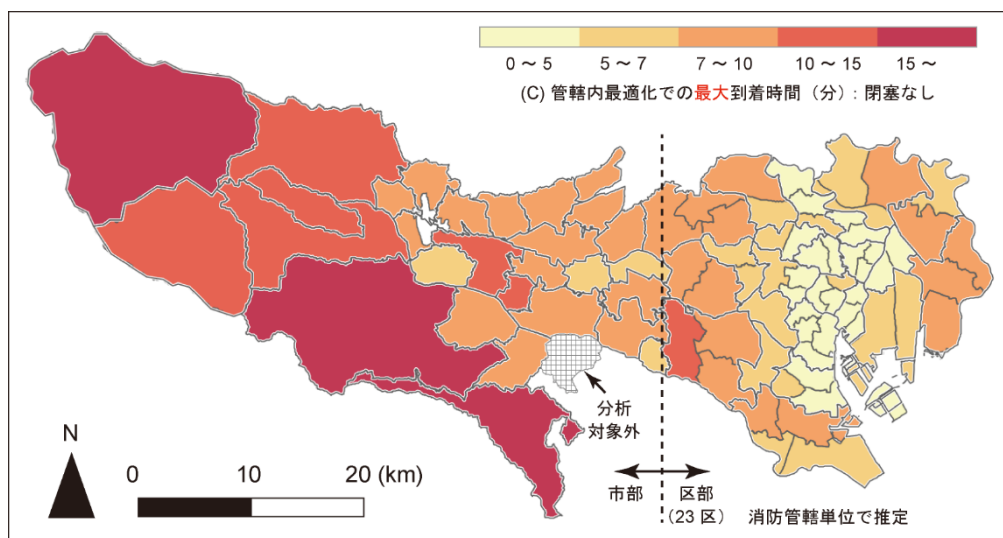


図 7.2.2-3 (C) 管轄内最適化での(I) 閉塞なしにおける
最大到着時間の空間分布

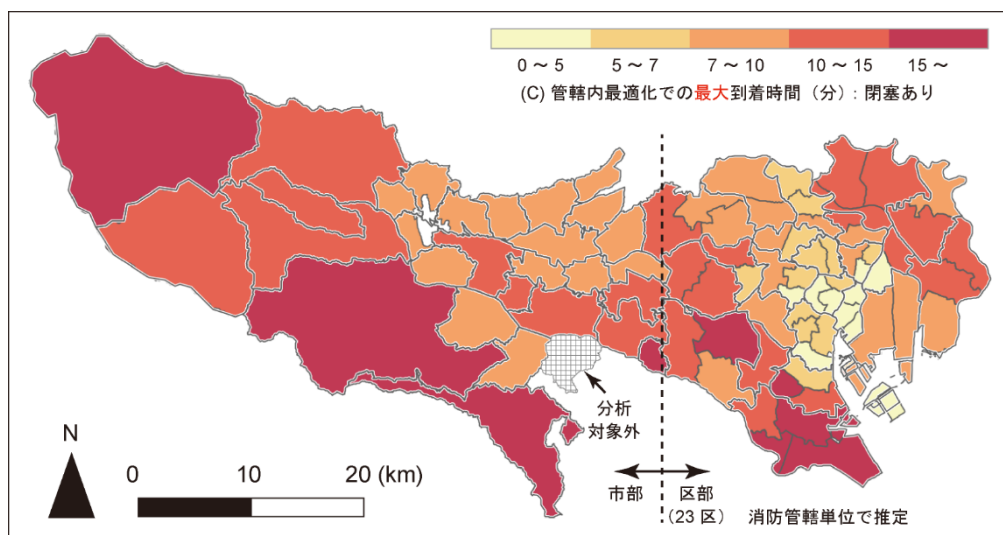


図 7.2.2-4 (C) 管轄内最適化での(II) 閉塞ありにおける
最大到着時間の空間分布

次に、延焼阻止失敗に起因する焼失棟数をみると、(I) 閉塞なしと(II) 閉塞ありの差が顕著に現れていることがわかる（図 7.2.2-5、図 7.2.2-6）。平均移動時間の差は数分程度であるが、発災直後の消防活動においては、この数分の差が延焼阻止の成否を大きく左右する。さらに、平均移動時間が 10 分以上、最大移動時間が 15 分以上の管轄で延焼阻止失敗による焼失棟数が増加していることがわかる。出火してから覚知・出場までには 5 分を要すると仮定していることから、限界到着時間の平均的な値が 20 分程度であることも整合する。以上より、消防隊が移動に割ける時間は非常に短いことが確認できた。

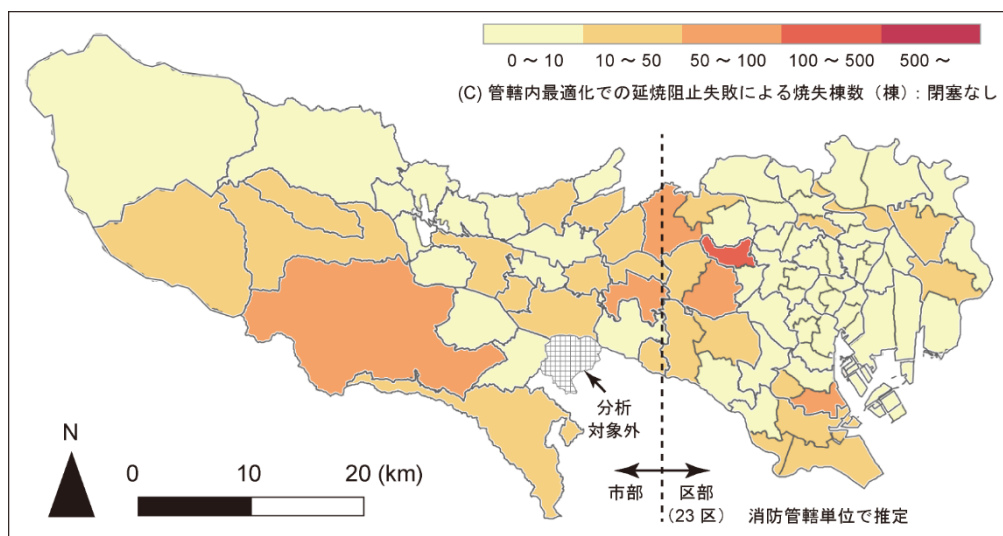


図 7.2.2 -5 (C) 管轄内最適化での(I) 閉塞なしにおける
延焼阻止失敗による焼失棟数の空間分布

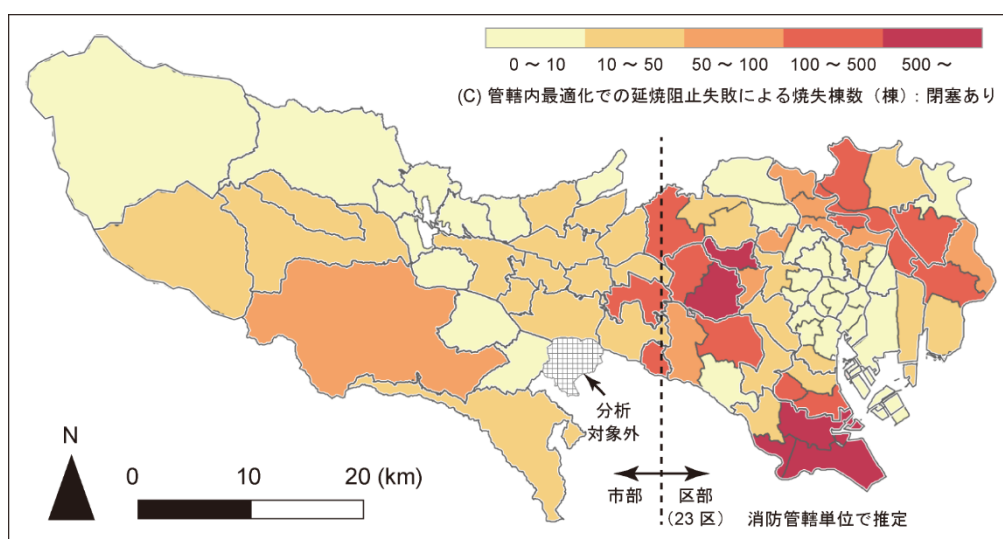


図 7.2.2-6 (C) 管轄内最適化での(II) 閉塞ありにおける
延焼阻止失敗による焼失棟数の空間分布

2.3 緊急輸送道路の沿道建物耐震化による移動時間・焼失棟数の低減効果

緊急輸送道路とは、震災時の救急消防活動等を円滑に行うために必要とされる重要な道路である。東京都は、防災拠点間を結ぶ道路等の緊急輸送道路の中でも、特に重要とされる道路を特定緊急輸送道路として指定し、その沿道建物の耐震化を推進している[2]。ここでは、東京都が指定した特定緊急輸送道路だけでなく、東京都内の全ての緊急輸送道路（図 7.2.3-1）が閉塞しなくなった場合を想定して、消防隊の移動時間を推定する。

図 7.2.3-2、図 7.2.3-3 をみると、緊急輸送道路の密度が高い都心部で移動時間が短縮されていることがわかる。しかし、消防活動の場合には、火災現場近くの細街路を利用せざるを得ない場合も多く、緊急輸送道路の整備のみで大幅に移動時間を短縮することは難しい。実際、東京都区部であっても、平均移動時間が 10 分以上の管轄や、最大移動時間が 15 分以上の管轄が残存しており、延焼阻止失敗による焼失棟数にも大きな変化は見られないことが判明した（図 7.2.3-4）。この結果は、消防隊の移動支援という観点からは、緊急輸送道路の整備と並行して、防災生活道路³⁸の拡幅や次節で検討する道路閉塞情報の収集といったソフトウェア的な対策が重要となる。

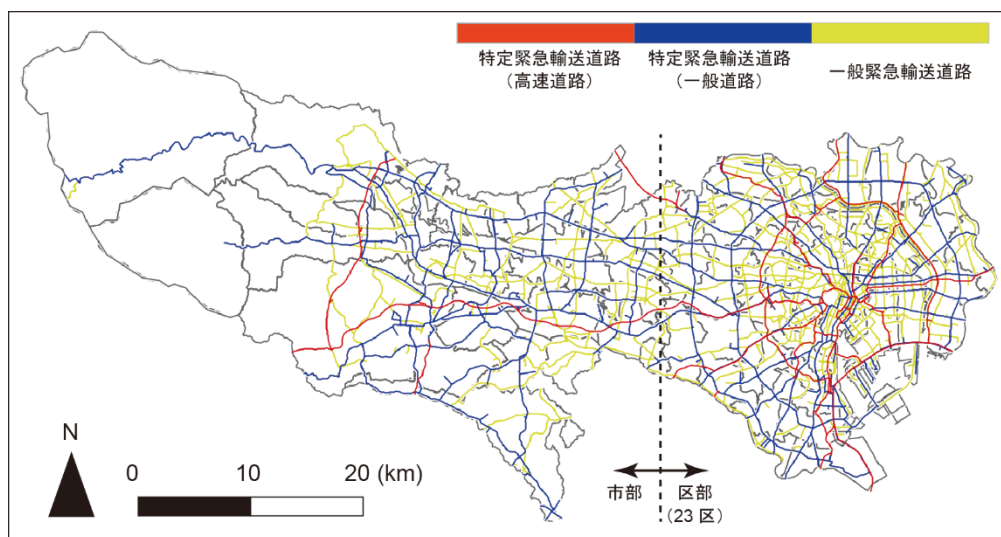


図 7.2.3-1 東京都内の緊急輸送道路の空間分布*

*緊急輸送道路とは、震災時の救急消防活動等を円滑に行うために必要とされる重要な道路である。東京都は、防災拠点間を結ぶ道路等の緊急輸送道路の中でも、特に重要とされる道路を特定緊急輸送道路として指定し、沿道建物の耐震化を推進している。

³⁸ 緊急車両の通行等に重要とされる幅員 6m 以上の道路や避難に重要とされる幅員 4m～6m の道路。

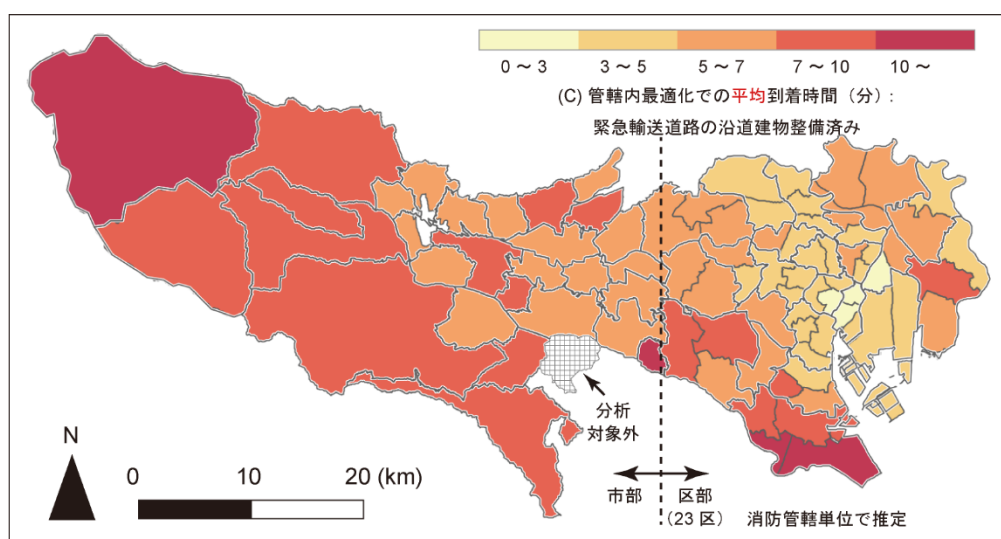


図 7.2.3-2 (C) 管轄内最適化での(III)緊急輸送道路の沿道建物整備済み における
平均到着時間の空間分布

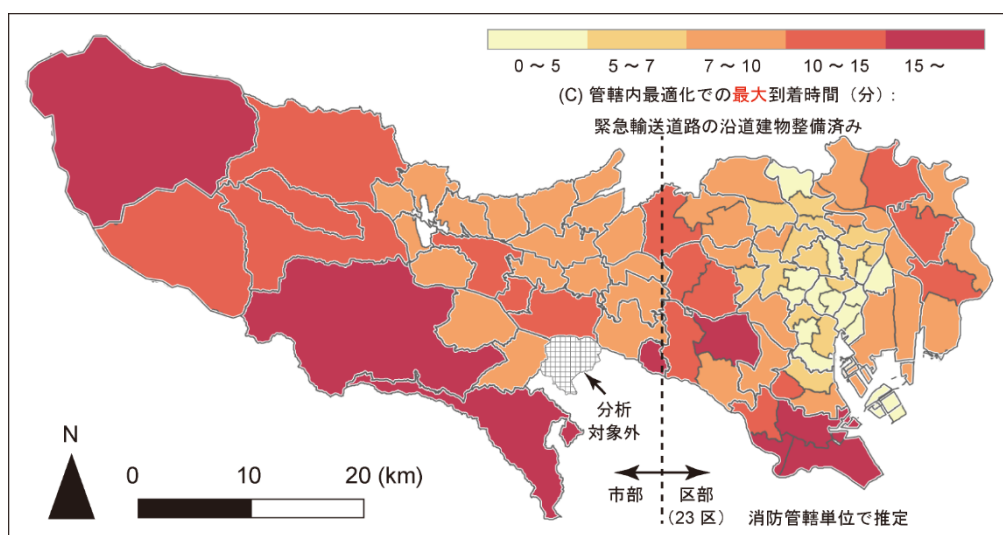


図 7.2.3-3 (C) 管轄内最適化での(III)緊急輸送道路の沿道建物整備済み における
最大到着時間の空間分布

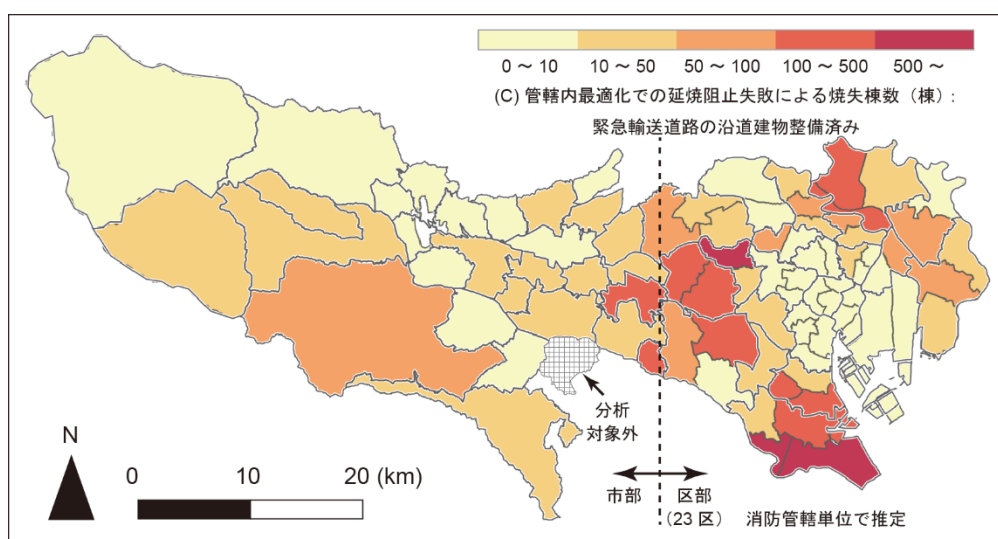


図 7.2.3-4 (C) 管轄内最適化での(III)緊急輸送道路の沿道建物整備済み における
延焼阻止失敗による焼失棟数の空間分布

2.4 道路閉塞情報による移動時間・焼失棟数の低減効果

これまでのシミュレーション結果に基づくと、緊急輸送道路等の重要な道路を整備するだけでは、火災現場付近等で細街路を利用せざるを得ない消防隊の移動を効率化することが困難であることが示された。そして、首都直下地震発生 of 切迫性を考慮すると、耐震化や不燃化等の実現までに長い時間を要するハードウェア的な対策のみでなく、比較的短時間で実現可能なソフトウェア的な対策を検討しておく意義が大きいと考えられる。

道路閉塞率の空間分布（図 2.4.3-3）をみると、道路閉塞率が 10~20%の地域も多く、初めから適切な迂回路を選択できれば、移動時間を大幅に短縮できる可能性が高い。そこで、ソフトウェアでの対策として道路閉塞情報を用いた経路探索支援を提案する。具体的には、情報収集システム等を用いて道路閉塞箇所を把握し、それらを避けた経路を提示することで、火災現場への移動を支援することの効果を検証する。まずは極端なケースとして、出場前にすべての閉塞箇所が把握できた場合（(IV) 閉塞把握）の効果について分析する。すなわち、消防隊は初めからガレキ幅を考慮した際の通行可能幅員（余裕幅）が 4m 以上の道路集合のみを用いて経路探索を行い、移動時間が最短となる経路で移動した場合の分析を行う。

移動時間の空間分布（図 7.2.4-1、図 7.2.4-2）をみると、5 分以内に到着できている管轄が増加しており、区部では 10 分以上となる管轄がなくなっていることがわかる（図 7.2.4-1）。最大移動時間を見ても、15 分以上となる管轄が少なくなっている（図 7.2.4-2）。この結果は、延焼阻止失敗による焼失棟数にも影響を及ぼしており、ほとんどの管轄で焼失棟数が 500 棟以下に抑えられていることがわかる（図 7.2.4-3）。

さらに、東京都全域での焼失棟数を比較すると（図 7.2.4-4）、(III) 緊急輸送道路の沿道建物整備済みでは、(II) 閉塞ありの焼失棟数から約 20%の低減とそこまで大きな効果はないが、(IV) 閉塞把握での焼失棟数は、(II) 閉塞ありの焼失棟数の半分程度にまで低減できていることがわかる。

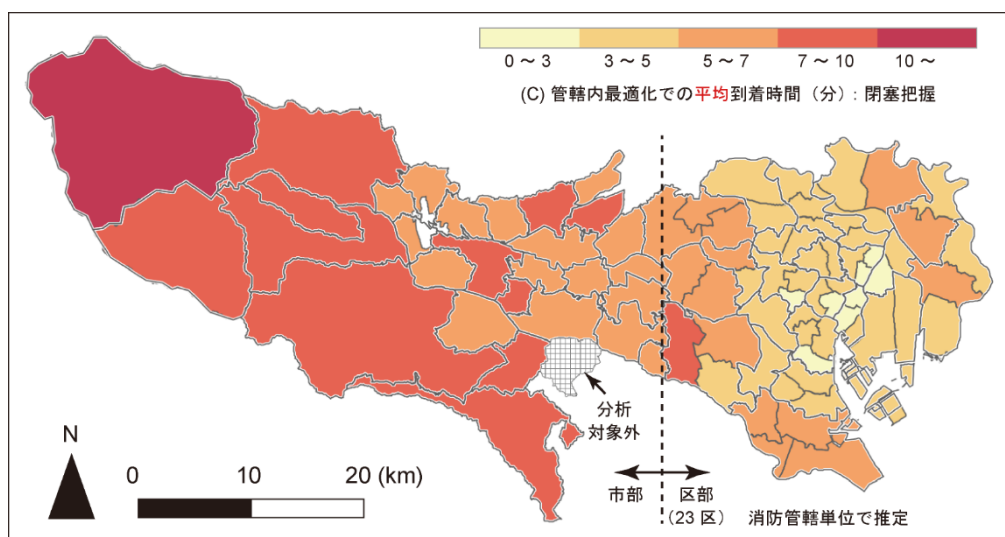


図 7.2.4-1 (C) 管轄内最適化での(IV) 閉塞把握における
平均到着時間の空間分布

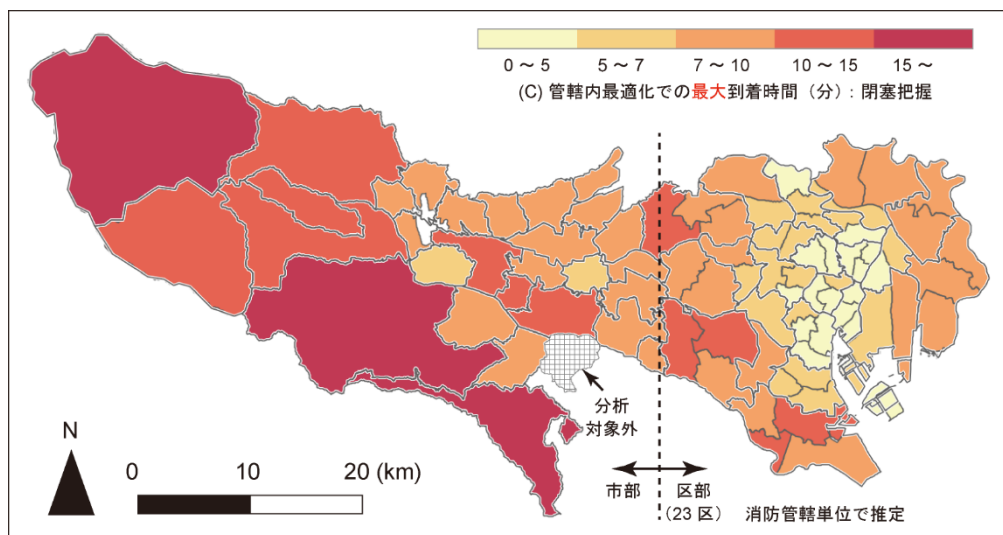


図 7.2.4-2 (C) 管轄内最適化での(IV) 閉塞把握における
最大到着時間の空間分布

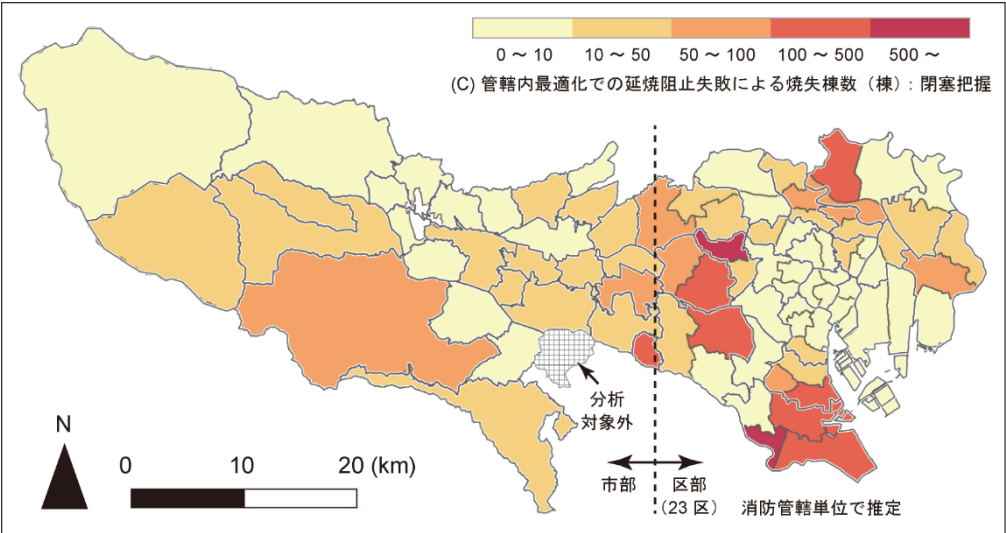


図 7.2.4-3 (C) 管轄内最適化での(IV)閉塞把握 における
延焼阻止失敗による焼失棟数の空間分布

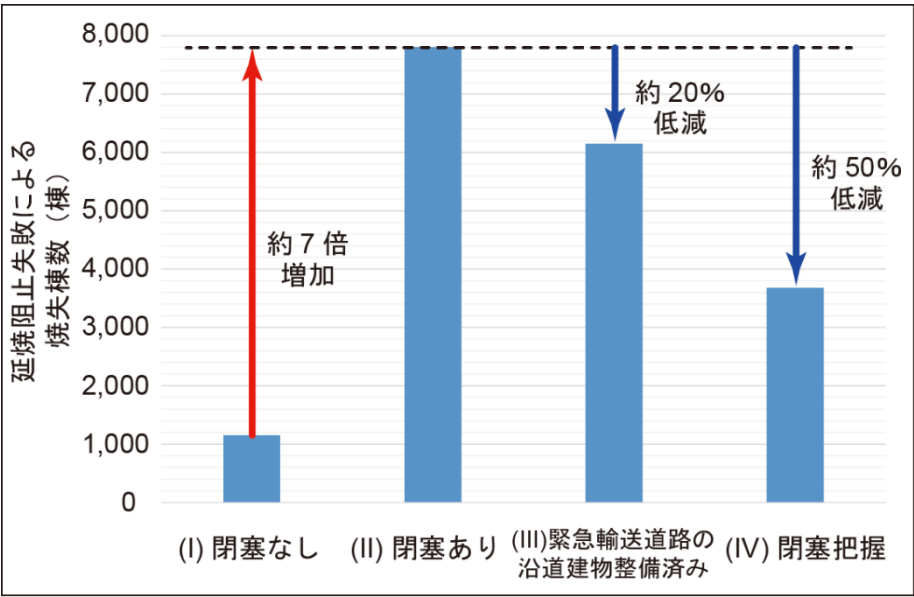


図 7.2.4-4 (C) 管轄内最適化における道路状況による
延焼阻止失敗による焼失棟数の変化 (東京都全域)

3. 地域住民による道路閉塞情報収集の効果

3.1 早期災害情報収集の概要

前節の結果によると、消防隊が出場する前に道路閉塞情報を取得することの意義は大きい。そこで、発災直後に災害情報を収集する方法について検討する。災害情報を収集する方法には、①高所カメラや高所見張、②ヘリコプターによる上空からの情報収集、③消防隊員や消防団員による巡回等が考えられる[49]。しかし、①高所カメラには災害情報や位置の特定に関する問題があり、②ヘリコプターを用いた方法では出動するまでに要する時間が長いなど、緊急性や網羅性、精度等の点で課題が残されている。兵庫県南部地震時に実際に行われた③消防隊員・消防団員の巡回による情報収集では、特殊なハードウェアを必要とせず、情報の精度や信頼性が高いという利点が認められた。しかし、人員数の制約や巡回時に閉じ込め者の救助を優先したことで、情報収集に遅延や偏りが生じる等、情報収集活動が十分に機能しなかったことも報告されている[49]。

そこで、本研究では、④人員の制約等の少ない地域住民（自主防災組織や防災ボランティア等）の協力が得られたことを想定し、発災直後から消防車両が出場するまでの時間を積極的に活用して、災害情報（道路閉塞情報）の収集を行った場合の消防隊の移動時間の短縮、および、焼失棟数の低減効果について検証する。具体的には、広域避難場所への移動中に情報収集を行う「避難収集」と、発災時位置の周辺を無作為に探索する「無作為収集」の2種類の情報収集方法について検討し、地域住民の人数（夜間人口に対する割合）や情報収集を行う時間と、道路閉塞数に対する収集された道路数の割合（閉塞把握率）との関係や、消防隊の到着時間との関係等について分析する。

3.2 早期災害情報収集行動モデル

ここでは、先述の 2 種類の情報収集方法を、以下のようにモデル化した（図 7.3.2-1、図 7.3.2-2）。

(1) 避難収集モデル

避難収集では、発災時の居場所から最も近い広域避難場所³⁹へ移動しながら、道路閉塞情報を収集・投稿することを想定した。ただし、一度広域避難場所に到着した後は、広域避難場所内で待機し、再度、広域避難場所を出て情報収集は行わないこととした。

(2) 無作為収集モデル

無作為収集では、発災時の居場所周辺を一定時間（30 分間）無作為に探索（ランダムウォーク）し、道路閉塞情報を収集・投稿する。ただし、自身が一度通行したことのある道路は、他の選択肢がある限り通らないものとした。また、どの道路も通過したことがある場合には、そのときの居場所（交差点）に接続する道路の中から無作為に 1 つ選択して移動することとした。

【両モデルで共通の仮定】

・情報収集開始時刻

どちらの情報収集モデルにおいても、地域住民（自主防災組織等）は、まず身の安全の確保等を行ない、発災から 5 分後に活動可能となるものと仮定した。

・道路閉塞情報の投稿と共有

地域住民は、交差点に到達するたびに、その交差点に接続している道路の閉塞状況を調査し、道路閉塞情報を収集・共有するシステム（情報収集システム）[48]へ投稿する。道路閉塞情報の投稿には 30 秒要するとし、他者が投稿した情報も含め投稿済みの道路閉塞情報について、再度投稿することはないものとした（図 7.3.2-1、図 7.3.2-2）。収集した道路閉塞情報は、スマートフォン等の携帯端末を用いて、情報収集システムへ投稿され、東京都全域で共有・活用されることを想定した。

・地域住民の初期位置

地域住民の発災時の居場所は、対象地域内の交差点上に一様乱数を用いて無作為に割り振った。

³⁹ 東京都市部では、広域避難場所が存在しない場合や名称が異なる場合があるが、指定緊急避難場所等の広域避難場所に相当するものを広域避難場所として扱っている。

・通行可能道路と通行速度

地域住民が通行可能な道路は、完全に閉塞している道路以外（余裕幅が 0m 以上の道路）とし、歩行速度は消防隊員よりも幾分遅めに設定した（6km/h）。

・情報収集を行う人数の基準

情報収集にあたる地域住民の数は、過去に事例がないため、東京都における平均的な消防団の人数である夜間人口の約 0.2%を基本とした（1 管轄あたり平均 330 名程度）。

・情報収集システムの想定

投稿する情報は、緯度・経度等のみで済むことから、データサイズも非常に小さく震災時であっても通信可能であることを想定する[48]。

・情報収集の終了条件

地域住民の負担を考慮して情報収集を行う時間は最大でも 30 分間と仮定した。発災から 5 分間は情報収集を行わないため、最大で発災から 5 分後～35 分後までに道路閉塞情報は収集される。ただし、避難収集の場合には、広域避難場所に到着した時点で情報収集を終了する。

・消防隊の経路探索に利用することのできる道路閉塞情報

消防隊の移動時間推定の際には、消防隊が出場する時刻までに収集された道路閉塞情報のみを用いて経路を探索する⁴⁰。

シミュレーションの条件は、第七章 第 2 節と同様とし、1,000 回のモンテカルロシミュレーションにより、平均到着時間や平均焼失棟数等を推定する。この条件では、(IV) 閉塞把握における消防隊の移動時間が最小となるため、参考値として以降の図に、(IV) 閉塞把握における結果も記載しておく。

⁴⁰ 例えば、発災直後に出場した場合には、道路閉塞情報をほとんど利用できないことになる。

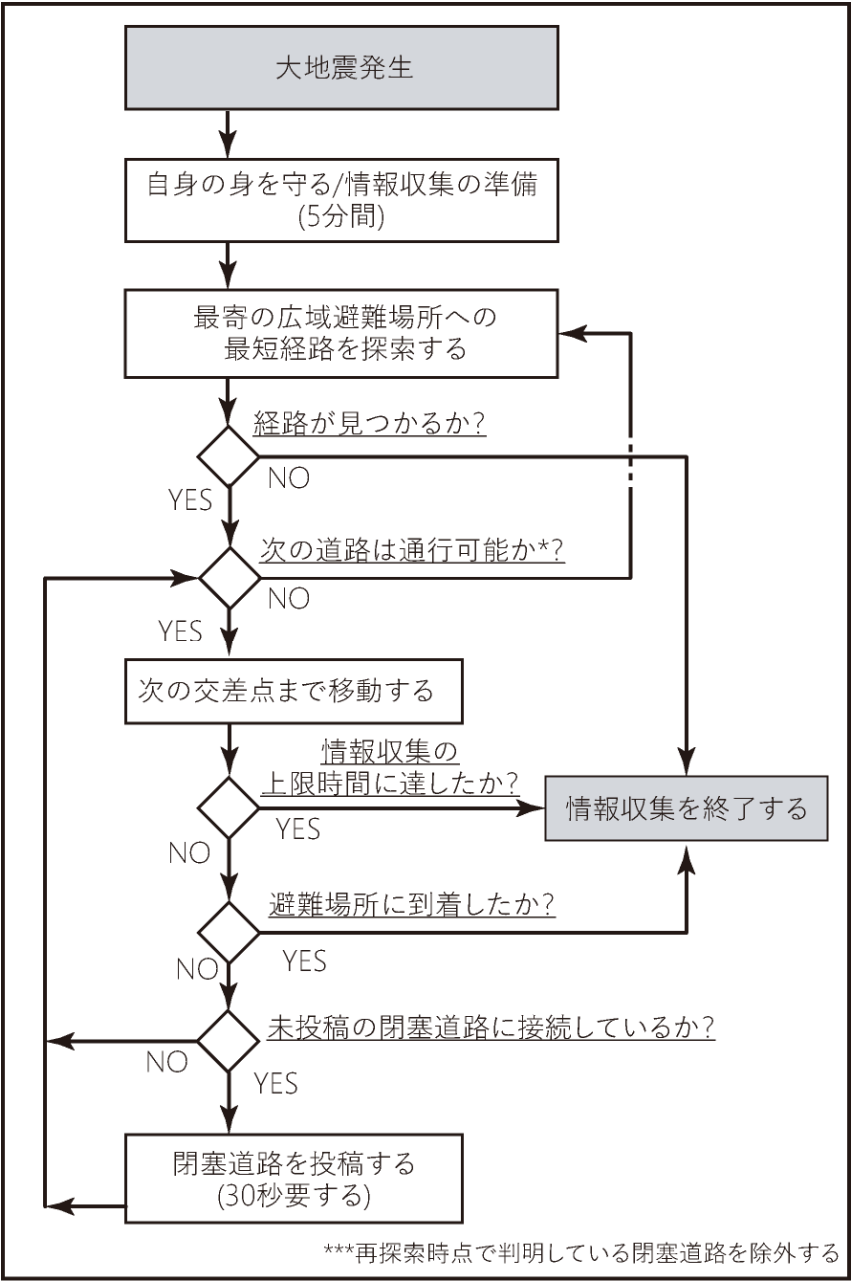


図 7.3.2-1 避難収集モデル

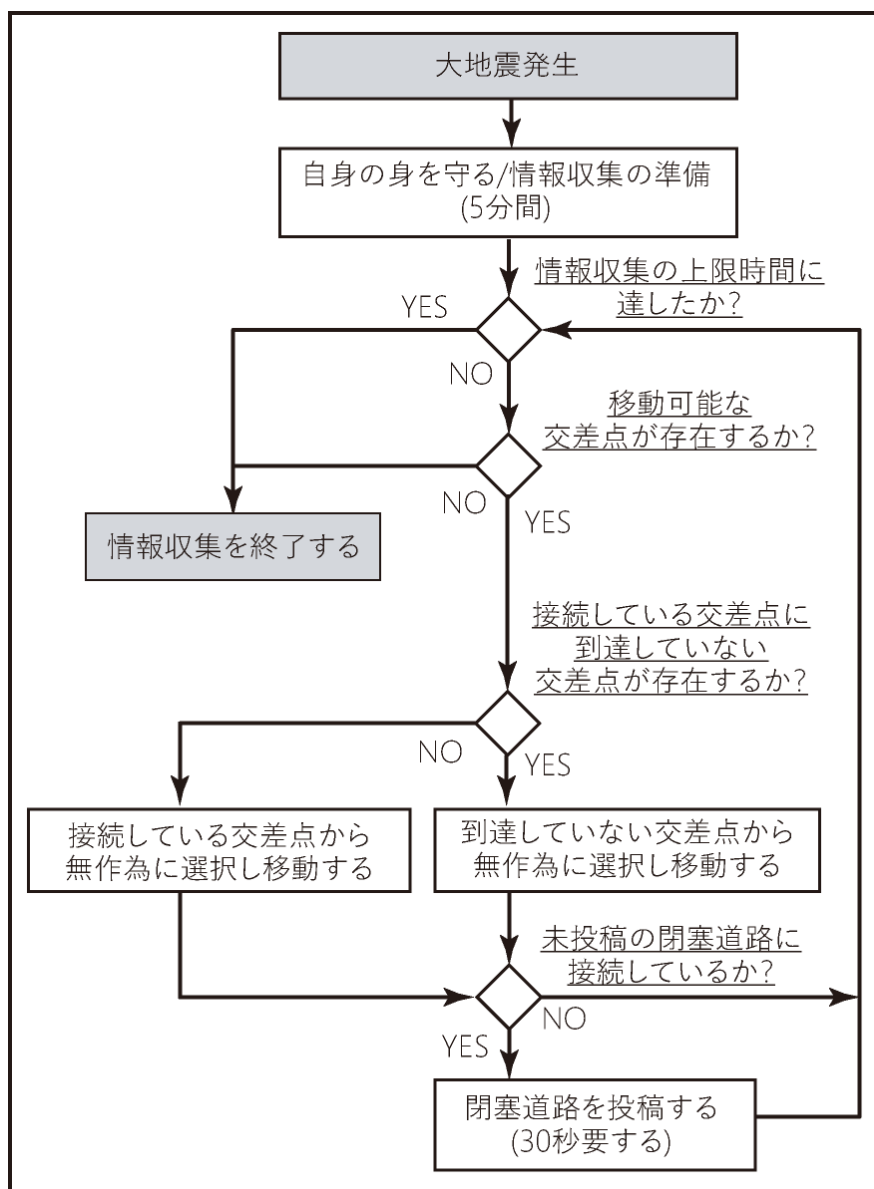


図 7.3.2-2 無作為収集モデル

3.3 情報収集方法による閉塞把握率の差異

基準とした夜間人口の 0.2% の人数（1 管轄あたり平均 330 名程度）が情報収集を行った場合の閉塞把握率の時間推移を図 7.3.3-1 に示してある（参考として 60 分間までをグラフ化している）。このような少人数であるにもかかわらず、どちらの情報収集方法でも情報収集開始からわずか 5 分程度で、全体の 35% 以上もの道路閉塞を把握可能であることがわかる。

情報収集方法ごとにみると、広域避難場所へ向かいながら情報収集を行う避難収集は、避難中⁴¹に数分間協力するだけの手軽な方法である反面、広域避難場所付近で移動経路が重なることや、避難場所に到着した後には情報収集を行わないため、閉塞把握率は情報収集開始から 10 分程度で約 40% 程度に収束している。一方、無作為に移動しながら情報収集を行う無作為収集は、地域住民への負担は幾分大きいですが、地域内で一様に情報が収集されるため、10 分間で 60% 程度、30 分後には 75% 程度収集できており、情報収集能力は高いといえる。

また、情報収集開始直後に閉塞把握率が 10% 程度にまで急上昇していることがわかる。このことから、情報収集を行う人数が増えれば、1 人当たりの閉塞箇所を探索する距離や時間が短くなるため、自身の目の前の道路状況を調査・投稿するだけであっても、消防隊の到着時間を低減するのに十分な道路閉塞情報を得られる可能性がある。

⁴¹ 発災直後には、延焼も進行していないため、情報収集による危険性は少ないと考えられる。

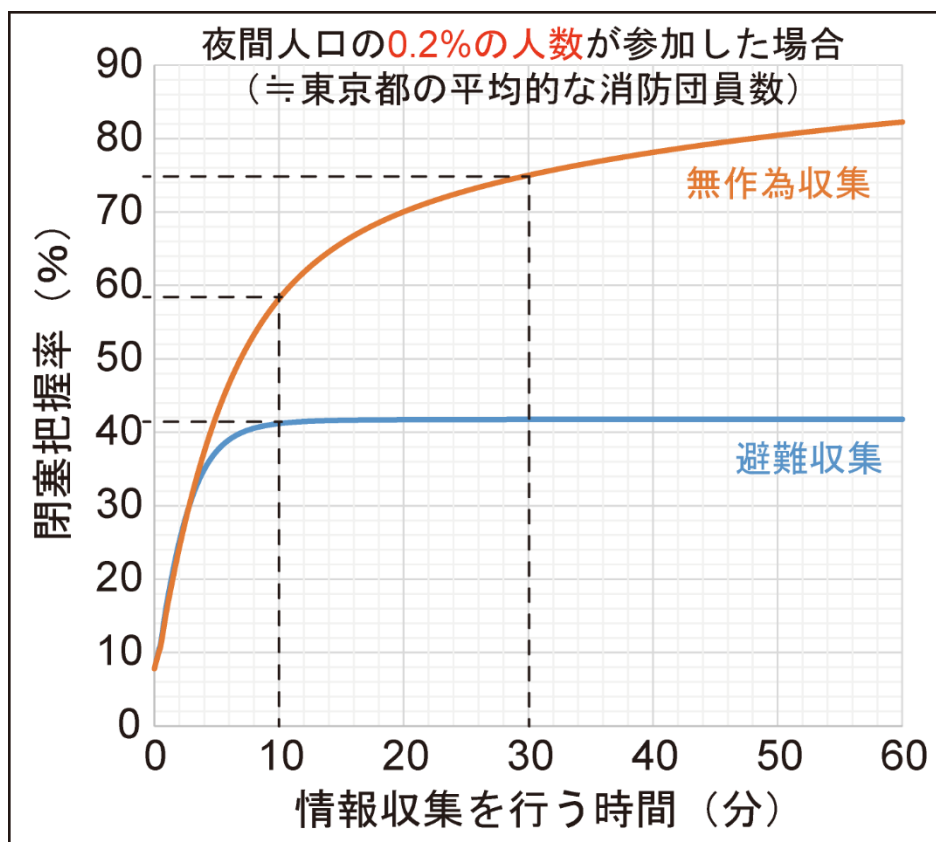


図 7.3.3-1 情報収集を行う時間と閉塞把握率の関係

3.4 情報収集を行う人数と消防隊の移動時間の低減効果

ここでは、情報収集を行う人数を 0% から 0.3% まで連続的に増加させ、閉塞把握率や消防隊の移動時間を推定する。夜間人口の 0.3% 程度の人数が避難中に道路状況を調査すれば、15 分程度の情報収集で道路閉塞の約 50% の道路閉塞情報を収集することができる（図 7.3.4-1）。さらに、無作為収集の場合には、75% 以上の道路閉塞情報が入手可能となる（図 7.3.4-1）。このとき、消防隊の移動時間は、避難収集の場合に平均で 30 秒、最大で約 11 分短縮され、無作為収集の場合には平均で 40 秒、最大では 13 分 30 秒ほど短縮される（図 7.3.4-2, 図 7.3.4-3）。平均移動時間ではわずかな変化のようにも見えるが、平均焼失棟数でみると、1,700～2,100 棟程度低減できており、道路閉塞情報収集の効果は大きいといえる（図 7.3.4-4）。

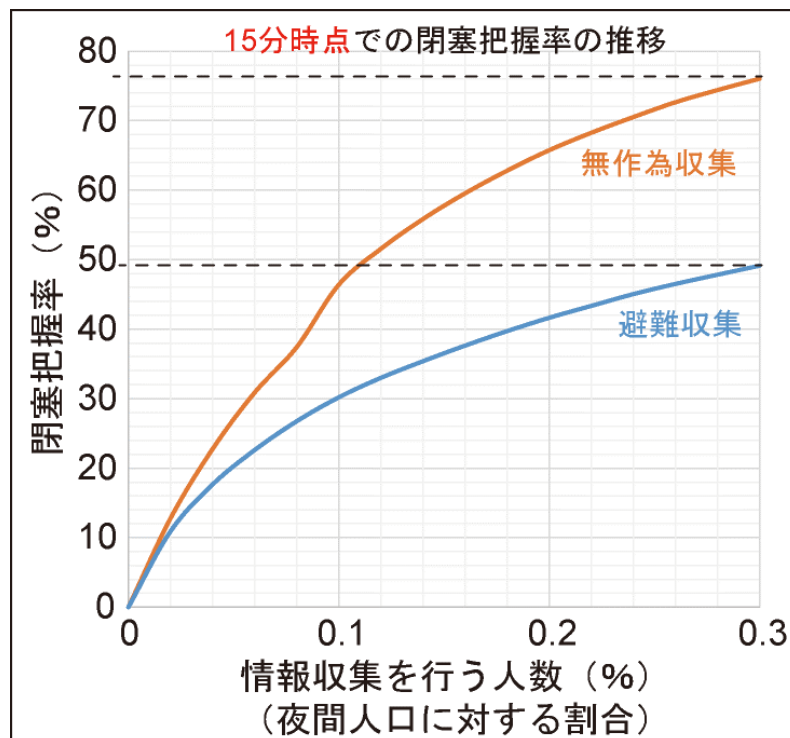


図 7.3.4-1 情報収集を行う人数と閉塞把握率との関係

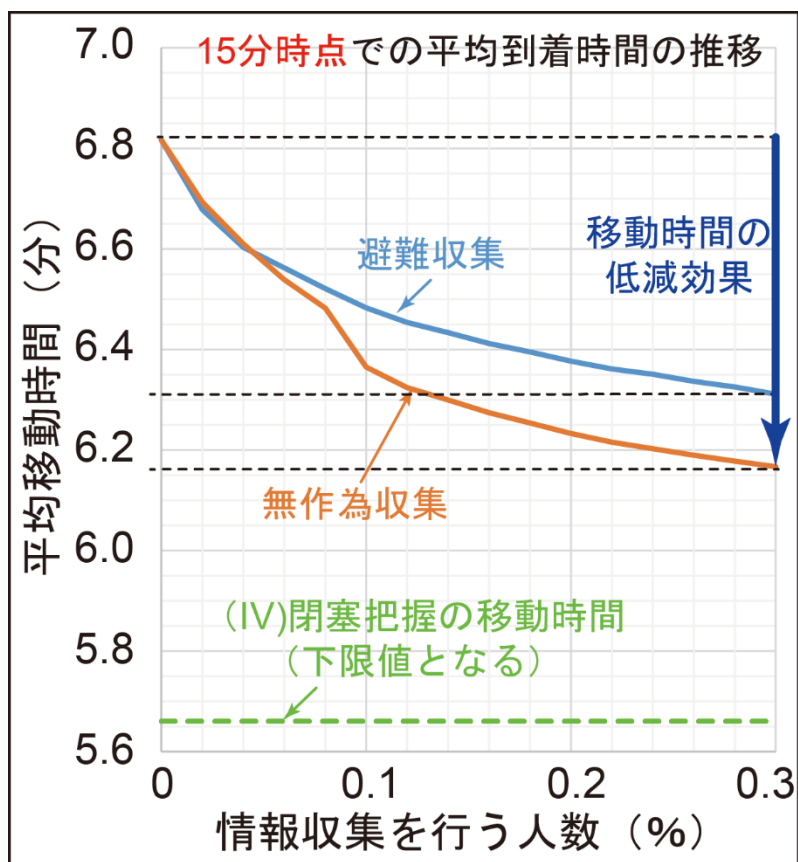


図 7.3.4-2 情報収集を行う人数と消防隊の移動時間との関係 (平均値)

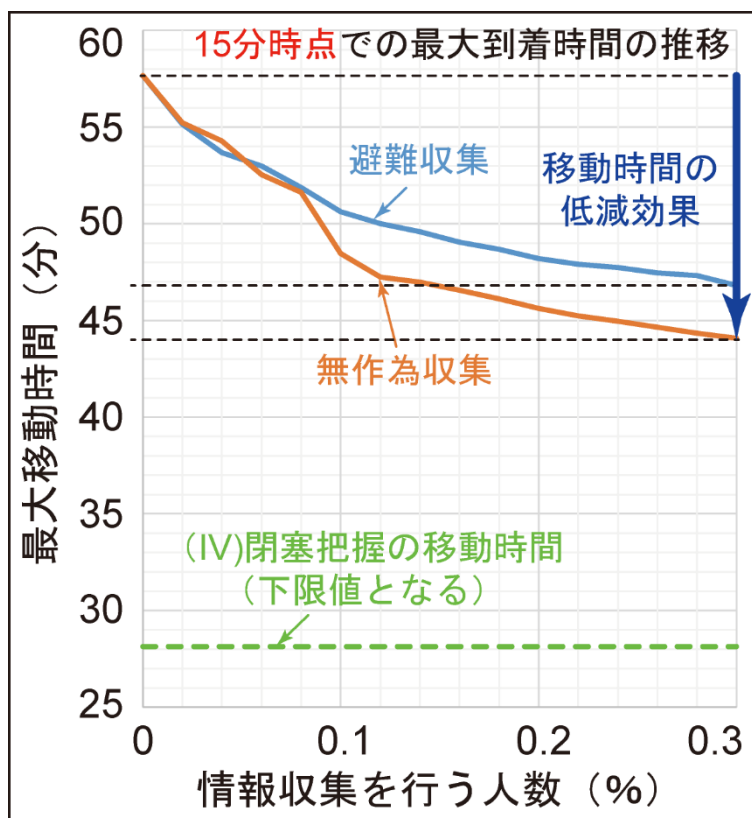


図 7.3.4-3 情報収集を行う人数と消防隊の移動時間との関係 (最大値)

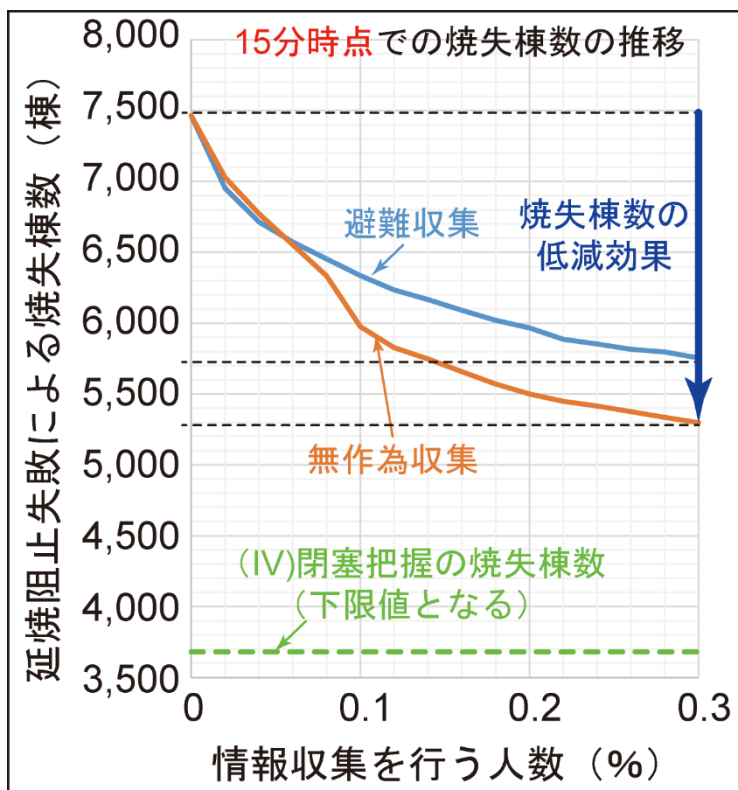


図 7.3.4-4 情報収集を行う人数と延焼阻止失敗による焼失棟数との関係

3.5 目今の道路状況のみを投稿する場合の効果

これまでのシミュレーション結果に基づく、情報収集はわずかな人数であっても十分な効果が見込まれるが、情報収集を行う人数が増加すれば、目今の道路状況のみの調査・投稿のみであっても十分な道路閉塞情報が得られる可能性が高い。そこで、情報収集を行う人数を0%~25%まで変化させ、目今の道路状況⁴²のみを調査した場合の閉塞把握率の推移を確認した（図7.3.5-1）。目今の調査のみのため、無作為収集・避難収集で得られる情報に差異はない。

図7.3.5-1をみると、約5%の人数が目今の道路状況のみを調査・投稿すれば、即座に80%以上の道路閉塞を、約10%の人数が調査・投稿すれば、95%程度の道路閉塞を把握できることが判明した。道路閉塞率はそれほど高くないため、調査はしても、投稿の必要がない（目今の道路が閉塞していない）地域住民も多いものと考えられる。ただし、本研究での地域住民の初期位置は、東京都内の交差点に一様に存在することを仮定しているため、実際の災害時に収集される情報には、空間的な偏りが生じる可能性があることに注意する。

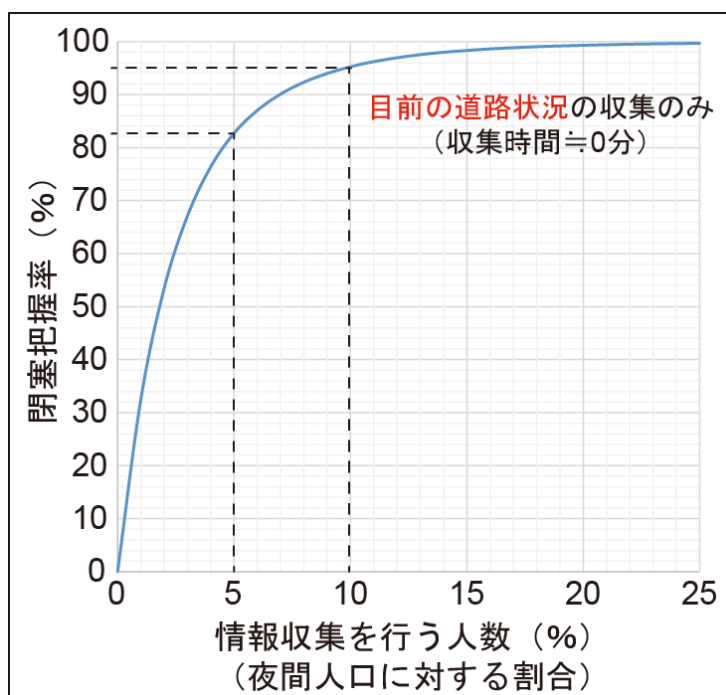


図7.3.5-1 目今の調査のみを行う場合の情報収集を行う人数と閉塞把握率の関係*

*地域住民が東京都内の交差点に一様に存在していることを仮定しているため、実際に収集される情報には、空間的な偏りが生じる可能性があることに注意する。

⁴² 発災時の初期位置となる交差点に接続している道路を目今の道路とした。

4. 断水状況を考慮した消火栓の利用可能性

4.1 消火栓の利用可能性分析の概要

これまでの分析では、既往研究[3,6]に倣い、消火栓の断水可能性を考慮し、消火栓以外の消防水利（防火水槽や河川等）のみを利用することを想定して分析を行ってきた。しかし、水量に制限がなく、配置密度も高い消火栓を利用することができれば、より効果的な消火活動が可能となり、焼失被害の低減につながることが期待される。

そこで本節では、大地震時の断水状況下での消火栓の利用可能性について分析を行う。具体的には、消防隊が利用する消防水利の選択肢として、「①消火栓利用なし（防火水槽や河川等のみ利用）」、「②消火栓利用あり（断水なし）」、「③消火栓利用あり（断水あり）」、「④消火栓利用あり（断水把握）」の4つの状況を想定した分析を行う。

①消火栓利用なし

消火栓を一切利用せず、防火水槽や河川のみを利用する想定である。

②消火栓利用あり（断水なし）

個々の配水管の耐震化（耐震継手の整備等）が進み、破損が一切発生しなくなった場合の想定である。消火栓利用を行う場合における最大の焼失棟数の低減効果をみるために、参考値として利用する⁴³。

③消火栓利用あり（断水あり）

到着した消火栓が断水していた場合には、消火栓利用をあきらめ、消火栓以外の消防水利のみの利用に切り替える場合の想定である。

④消火栓利用あり（断水把握）

東京都が2018年春を目標に導入を進めている水圧測定機器[50]⁴⁴の設置が完了し、断水している消火栓等が遠隔地から把握できる想定である。

まず、第五章での条件に基づき、1,000ケースの異なる物的被害状況（建物倒壊・道路閉塞・出火延焼・断水）を推定する。次に、市街地被害状況と消防活動モデルに基づき、モンテカルロシミュレーション（1,000回）により平均焼失棟数を推定する。非出場（放任）火災による焼失棟数は、利用する消防水利の選択肢に依存しない（出場する火災建物にのみ依存する）ため、ここでは、延焼阻止に失敗した火災による焼失棟数のみに着目する。

⁴³ 厳密には、道路閉塞状況との関係（例えば、利用を試みた消火栓の周辺が著しく閉塞していた場合等）により、低減効果の最大値となるとは限らないが、参考値にはなるものと考えられる。

⁴⁴ 東京都が2018年春を目標に導入を進めている水圧測定機器[50]は、災害に強いPHS回線を利用し、普段よりも大幅に水圧の下がった施設を遠隔地から把握可能とする装置である。

4.2 消火栓利用による焼失棟数の低減効果

焼失棟数の低減効果を分析する上での参考値として、想定①における、延焼阻止失敗に起因する焼失棟数の空間分布を図 7.4.2-1 に示してある。焼失棟数の高いエリアが東京都 23 区内に点在していることがわかる。消火栓以外の配置密度（図 7.4.2-2）を見ると、こうした地域では、消火栓以外の水利が十分に配備されていない管轄が多いことがわかる。

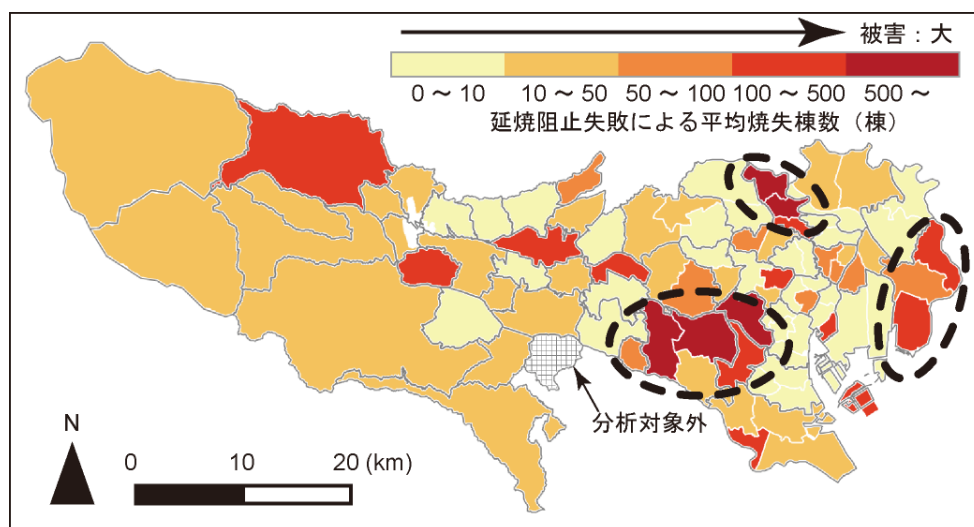


図 7.4.2-1 延焼阻止失敗による焼失棟数の空間分布
(①消火栓利用なし：防火水槽や河川のみ利用)

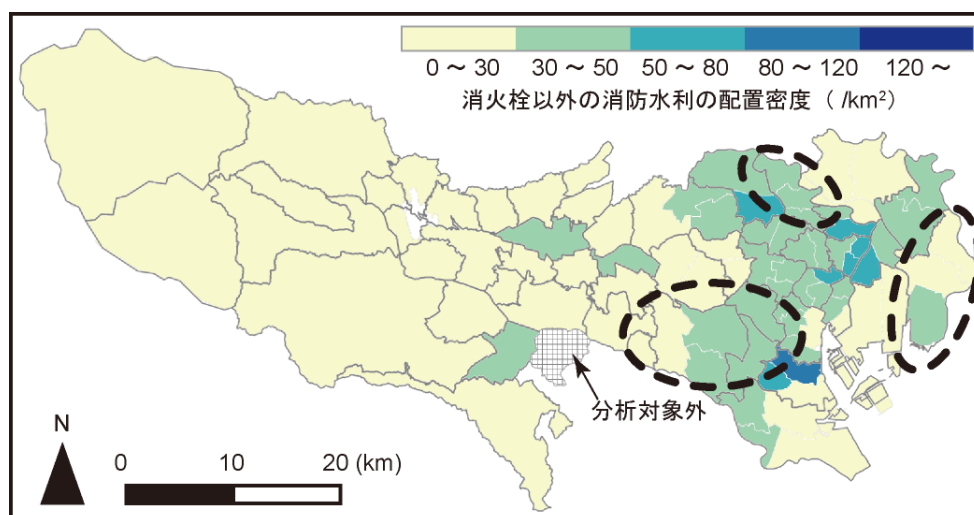


図 7.4.2-2 消火栓以外の消防水利の配置密度

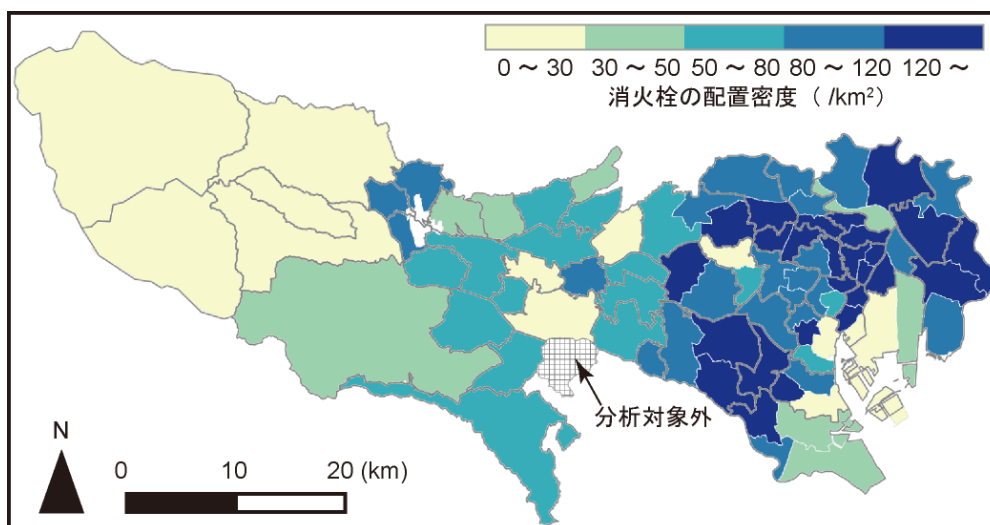


図 7.4.2-3 消火栓の配置密度

次に、想定①と想定②を比較すると、消火栓を利用することでほぼ全ての管轄で焼失棟数を低減できていることが確認できる（図 7.4.2-4）。また、断水率と焼失棟数の低減効果の関係を見ると（図 7.4.2-5）、焼失棟数を平均 100 棟程度低減できる管轄もある程度存在し、中には 400 棟程度低減できる管轄も存在する。一方、消火栓の密度が高い管轄であっても、焼失棟数の低減効果が小さい管轄が存在する（図 7.4.2-3、図 7.4.2-4、図 7.4.2-7）。これは、都心部等に関しては、もともと延焼阻止失敗による焼失棟数が少ない管轄も多く（図 7.4.2-1）、さらに、消火栓以外の消防水利（防火水槽等）がある程度効率よく配置されているためと推察される（図 7.4.2-2、図 7.4.2-6）。

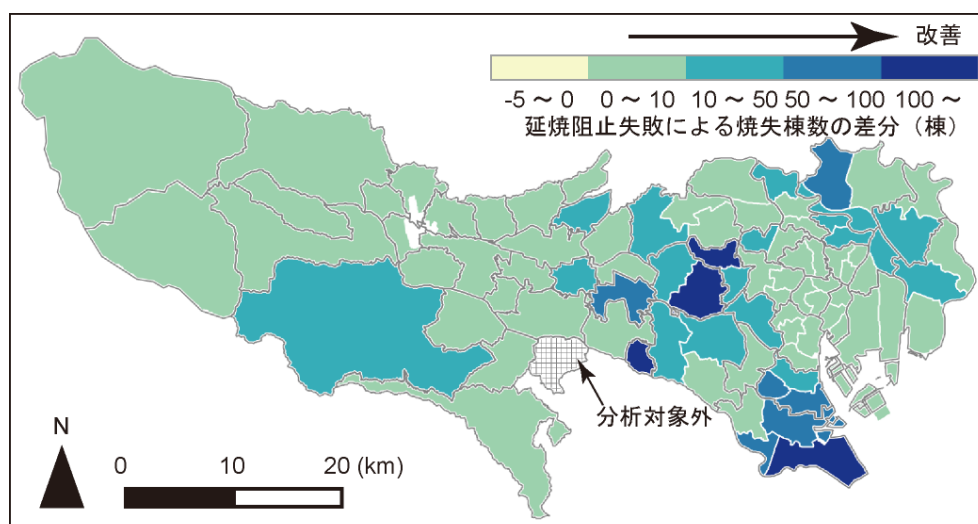


図 7.4.2-4 延焼阻止失敗による焼失棟数の差分

(①消火栓利用なし — ②消火栓利用あり：断水なし)

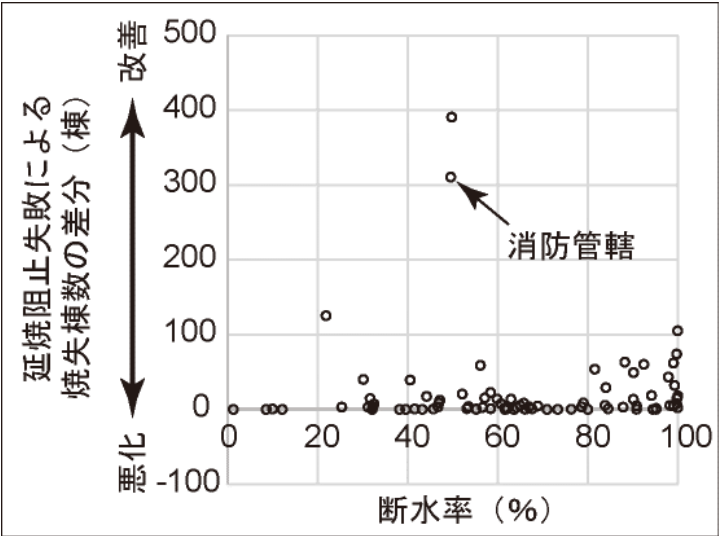


図 7.4.2-5 延焼阻止失敗による焼失棟数の差分と断水率との関係
(①消火栓利用なし — ②消火栓利用あり：断水なし)

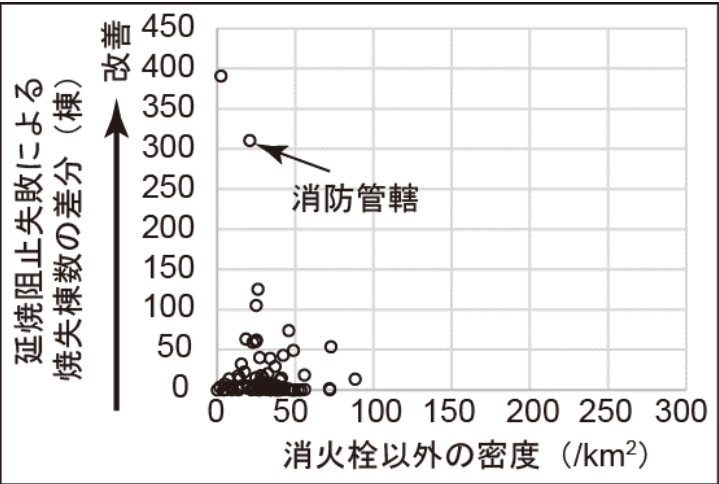


図 7.4.2-6 延焼阻止失敗による焼失棟数の差分と消火栓以外の配置密度との関係
(①消火栓利用なし — ②消火栓利用あり：断水なし)

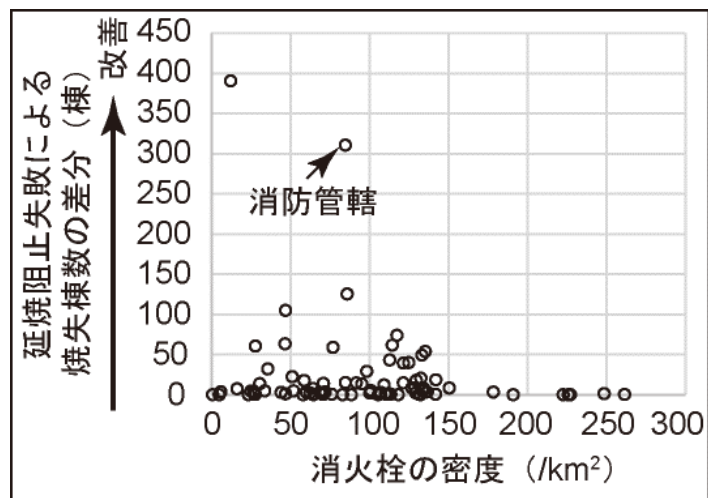


図 7.4.2-7 延焼阻止失敗による焼失棟数の差分と消火栓の配置密度との関係
(①消火栓利用なし — ②消火栓利用あり：断水なし)

4.3 断水した消火栓による焼失棟数への影響

断水状況下で消火栓利用を試みた場合（想定③），想定①と比較して焼失棟数が増加してしまう管轄は，全部で46管轄（56.1％）存在する（図7.4.3-1）．しかし，焼失棟数が10棟以上増加してしまう管轄は8管轄（9.76％）であり，最大でも約37棟の増加に留まっている（図7.4.3-2）．一方，断水率が50％以下の管轄では，焼失棟数を100棟以上低減できる管轄も見られ，断水状況下であっても消火栓を利用することの効果うかがえる（図7.4.3-2）．

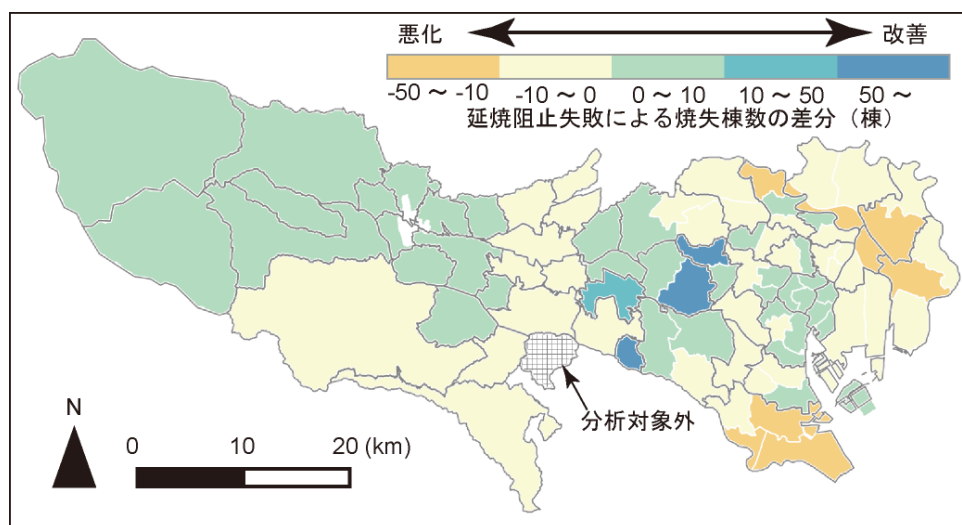


図 7.4.3-1 延焼阻止失敗による焼失棟数の差分
 (①消火栓利用なし — ③消火栓利用あり：断水あり)

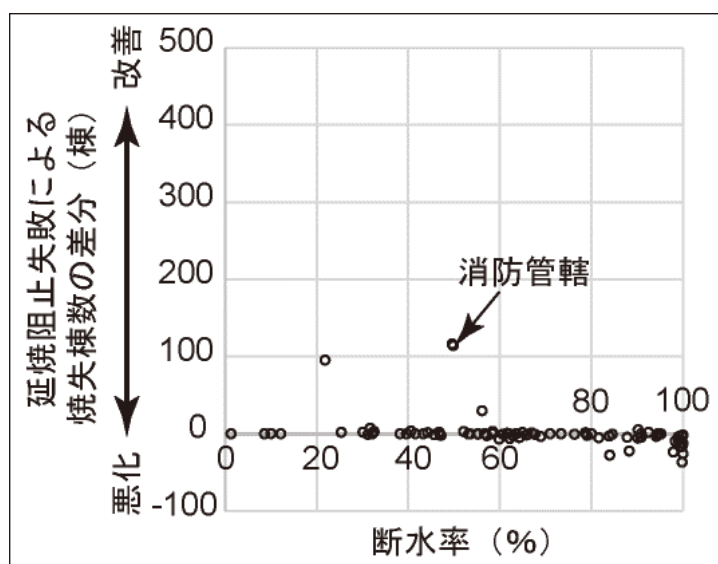


図 7.4.3-2 延焼阻止失敗による焼失棟数の差分と断水率との関係
 (①消火栓利用なし — ③消火栓利用あり：断水あり)

4.4 水圧測定機器に基づく断水状況の把握による焼失棟数の低減効果

水圧測定機器[50]の導入により、断水している可能性の高い消火栓をあらかじめ把握でき、断水していない消火栓のみを利用した場合（想定④）、ほぼ全ての管轄で焼失棟数を低減できる（図 7.4.4-1）。特に、断水率が低い管轄では、焼失棟数を 200 棟近く低減できる管轄もある（図 7.4.4-2）。一方、想定②の場合に、100 棟近く焼失棟数を低減できていた管轄の多くが、断水率の高い地域であったため、想定④では利用可能な（断水していない）消火栓が少なく、想定②ほどの低減効果は得られないことが判明した（図 7.4.4-2）。こうした地域では、防火水槽等が不足しており（図 7.4.4-2）、現状のままでは、消火栓の利用も期待できないため、配水管の耐震化や新たな防火水槽等の設置を促進する必要があると考えられる。

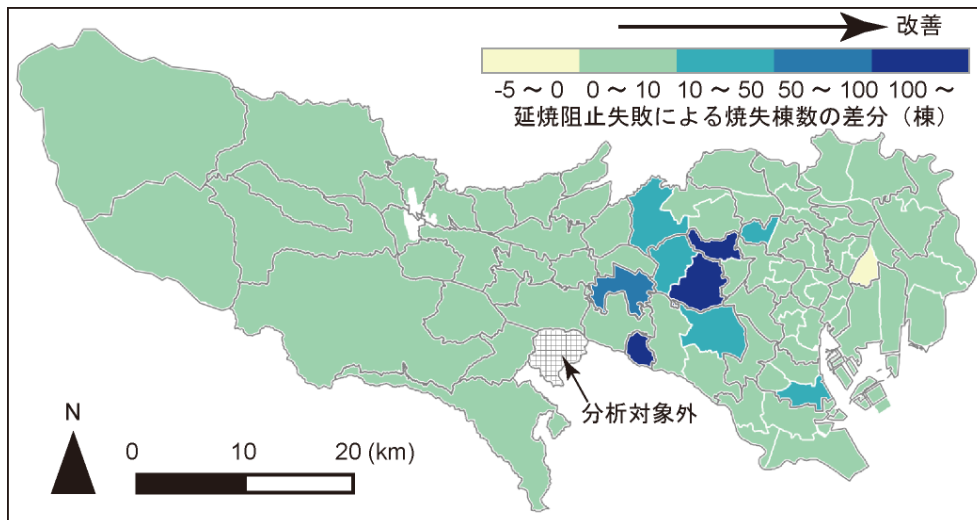


図 7.4.4-1 延焼阻止失敗による焼失棟数の差分
(①消火栓利用なし — ④消火栓利用あり：断水把握)

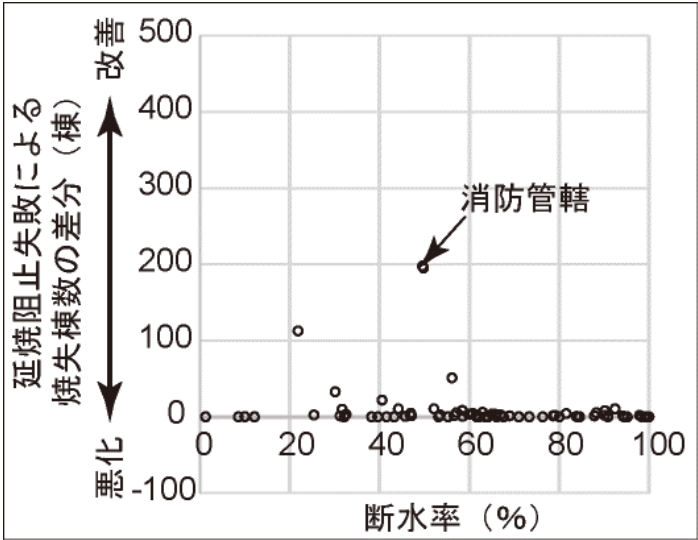


図 7.4.4-2 延焼阻止失敗による焼失棟数の差分と断水率との関係
(①消火栓利用なし — ④消火栓利用あり：断水把握)

4.5 断水状況下での消火栓の利用可能性の検討

これまでの分析を踏まえ、断水状況下での消防活動における消火栓の利用可能性について検討する。消火栓が全て利用できれば、焼失棟数を 400 棟程度低減できる管轄が存在する（図 7.4.4-2）。しかし、都心部等においては、消火栓以外の消防水利（防火水槽等）が既にある程度効率的に配置されているため、断水状況下では、無理に消火栓を利用せずとも、十分効果的な消防活動を行うことができる管轄も多い。一方、断水状況が遠隔地から把握できる状況下であれば、大地震時であっても、ほぼすべての管轄で焼失棟数を低減できるため、水圧測定機器等の導入を促進することは重要である。特に、断水率が低い管轄等においては、200 棟近くの焼失棟数を低減できる可能性も示唆されており、消火栓利用を検討する価値がある。

また、消火栓以外の消防水利の位置と消防隊のホースの長さから概算した、消火栓なしでの消防活動が困難な建物⁴⁵を図 7.4.5-1 に示してある。消火栓利用なしの場合には、消防隊の到着が困難な建物が概算で 2 万棟程度存在していることが判明した。すなわち、これらの建物から出火した際には消火栓の利用が必須となる。一方、消火栓の数は十分であるが、断水率が高い等の理由により、断水状況把握の効果が小さい管轄では、配水管の耐震化や防火水槽の増設が重要となる。

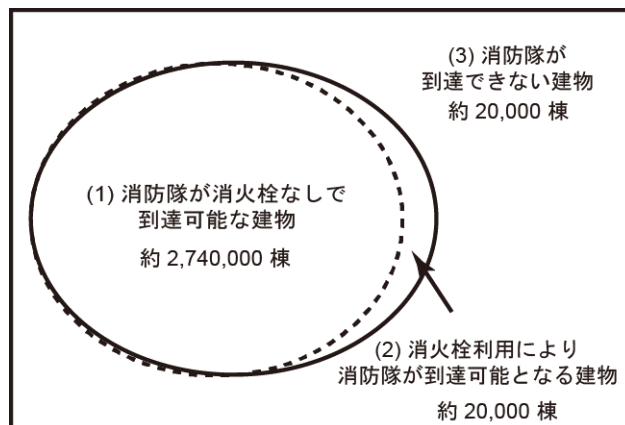


図 7.4.5-1 消火栓利用の有無と消防隊の到達可能性の差異*

*ポンプ車が積載しているホース数や長さ、消防隊の放水口数、道路の屈曲率を考慮し、空間検索により簡易的に推定した。なお、平常時（同時多発火災でない場合）であれば、複数台のポンプ車が出場する等で到達不可能となっている建物（(2)や(3)の建物）であっても到達可能であることに注意する。

⁴⁵ 図 7.4.5-1(2)に所属する建物の半径 308m（消防隊が 2 口放水可能な最大距離である 20m のホース 22 本＝440m に、道路の屈曲率を考慮し 0.7 を乗じた距離）以内には、消火栓以外の消防水利が存在しない。なお、平常時（同時多発火災でない場合）であれば、1 つの火災現場へ複数のポンプ車が出場するため、1 口放水にする等でホースの延長等も可能であると考えられる。しかし、大地震時にはポンプ車 1 台のみが出場するため、1 口放水では延焼阻止が困難であると考えられる。また、図 7.4.5-1(3)に所属する建物の半径 308m 以内には、消火栓も含めても消防水利が存在していない。

5. 第七章のまとめ

第七章では、消防隊の火災現場までの移動支援による延焼阻止可能性の向上という観点から分析を行った。まず、緊急輸送道路の沿道建物の耐震化のみでは、大きな焼失棟数の低減効果は見られないことが判明した。これは、消防活動においては、火災現場付近の細街路を利用せざるを得ない場合が多いことに起因すると考えられる。一方で、全ての道路閉塞状況が把握できた場合には、初めから道路閉塞を避けた適切な経路を選択できるため、到着時間の遅延が小さくなると考えられる。シミュレーション結果に基づくと、東京都区部で最大移動時間が15分以上となる管轄が少なくなり、ほとんどの管轄で焼失棟数が500棟以下に抑えられることが判明した。

そこで、道路閉塞状況を把握するために、自主防災組織等に所属する地域住民による早期災害情報収集を提案し、消防隊の火災現場までの移動時間に与える効果を分析した。具体的には、避難中に情報収集を行う避難収集と、周辺を無作為に探索する無作為収集の2種類の情報収集行動をモデル化し、収集された道路閉塞情報と火災現場までの移動時間との関係や、延焼阻止失敗に起因する焼失棟数の低減効果に関する分析を行った。避難中に情報収集を行った場合であっても、情報収集開始から5分程度で35%以上の道路閉塞が把握可能であることが判明した。ただし、約10分後からは避難場所に到着し始めることや、避難場所周辺の移動経路が重複する等して、道路閉塞の把握割合は40%程度に収束する。一方、周辺を無作為に情報収集する場合には、地域住民への負担は増加するが、地域内で一様に情報が収集されるため、情報収集能力は高く、10分間で約60%、30分後には75%程度の道路閉塞が把握できる。また、夜間人口の0.2%程度（平均的な消防団員の人数）といったわずかな人数であっても、消防隊の移動時間は、最大で12分ほど短縮される。このときの平均焼失棟数は、道路閉塞情報がない場合と比較して1,500~2,000棟低減できており、移動時間の短縮による効果は大きいといえる。さらに、情報収集を行う人数が増加すれば、目前の道路状況の調査だけでも消防隊の到着時間を短縮するのに十分な道路閉塞情報を収集できる可能性も示した。ただし、地域住民の発災時位置は、東京都内の交差点に一様分布していることを仮定しているため、発災時刻等によっては発災時位置が空間的に偏る等して収集された情報にも空間的な偏りが生じる可能性があることに注意する。地域住民の発災時の位置情報を考慮した精緻な分析は今後の課題である。

第七章の最後には、大地震時の断水状況下での消火栓の利用可能性について検討し、移動距離を短縮することによる延焼阻止失敗に起因する焼失棟数の低減を試みた。断水状況下で消火栓の利用を行った場合、焼失棟数が増加してしまう管轄が存在することが確認できた。ただし、ほとんどの管轄で、その差は10棟以内に留まっており、最大でも約37棟の増加であった。加えて、断水率が50%以下の管轄であれば、焼失棟数を100棟以上低減できる管轄も見られ、一部の管轄では断水状況下であっても消火栓が十分に機能することが判明した。さらに、水圧測定機器の導入により、断水している消火栓が事前に判明して

いる場合には、断水率の低い管轄で 200 棟近くの焼失棟数を低減できることも示唆されており、これらの管轄では、消火栓利用を検討する価値がある。

第八章

結論

1. 本研究のまとめ

本研究では、まず、第二章から第四章で市街地被害シミュレーションモデルの構築を行った。そして、計算量の問題等からこれまで実現されてこなかった大規模かつマイクロスケールのシミュレーション実験を可能とした。また、市街地被害シミュレーションを東京都全域で実行し、首都直下地震時の市街地被害状況を明らかにした。第五章では、大地震時の市街地被害状況下での消防隊の出場支援について検討するために、消防活動モデルを構築した。この消防活動モデルは、同時多発火災時の出場先決定モデルと、火災現場までの移動モデルから構成されている。第六章・第七章では、これまでに構築したシミュレーションモデルを用いて、出場先決定と延焼阻止の観点から消防活動戦略の提案と、その有効性の検証を行った。特に、相対的な延焼危険性の予測に基づく出場先決定戦略の提案と検証（第五章・第六章）、および、この戦略を可能とした大規模延焼シミュレーションの実現（第四章）は、本研究の主要な貢献内容であると考えている。最後に各章の要約を以下に示しておく。

【第一章 序論】

第一章では、同時多発火災特有の現象や市街地被害状況下での消防活動の困難さについて整理した。次に、消防隊の出場先決定と火災現場までの移動に関する既往研究を概説した。最後に、大地震時の同時多発火災における効果的な消防活動戦略の提案を通して、消防隊の出場を支援することが本研究の目的であると述べた。

【第二章：地表面応答・建物倒壊・道路閉塞モデル】

第二章では、道路閉塞が消防隊の到着時間に及ぼす影響を定量的に分析するために必要な、一連の物的被害モデルについて整理した。具体的には、まず表層地盤特性と震源からの距離に基づき地表面での地震応答の推定を行った。次に、この地震応答や建物の耐震性能に基づき倒壊する建物を推定した。最後に、各道路について倒壊した沿道建物の特性や道路幅員等に基づき、道路閉塞状況を道路単位で推定した。

【第三章：消火栓の断水シミュレーションモデル】

第三章では、大地震時の消火栓の利用可能性について検討するために、消火栓の断水シミュレーションモデルの構築を行った。従来までは、市区町村単位等の集計量に基づき断水率を推定するモデルが用いられてきたが、実際の断水現象は、配水管網上で連続的に発生すると考えられる。すなわち、給水地点付近の配水管の破損が遠方の地域への配水可能性に影響すると考えられる。本研究では、このような配水管網上での連続的な断水現象を推定するために、配水管の破損確率モデルと、破損した配水管を配水不能とした際の到達可能性解析を組合せ、連続的な断水シミュレーションモデルを構築した。

【第四章：建物出火・市街地延焼モデル】

第四章では、消防活動戦略を評価するうえで重要となる建物出火と市街地延焼の推定を行った。出火建物は、地震応答や建物用途（火気器具の保有率等）に基づき推定した。次

に、市街地延焼モデルの代表として、最終的な延焼被害のみを簡易的に推定する延焼クラスモデルと、計算負荷は高いが延焼過程が時系列で推定可能な延焼シミュレーションモデルの比較を行った。消防活動においては、延焼過程の情報や建物単位での延焼危険性の把握が重要であることから、本研究では計算アルゴリズムの改良により、これまで計算困難と考えられてきた大規模かつマイクロスケールの延焼シミュレーションを実現した。最後に、大規模延焼シミュレーションの成果として、新たに 2 つの延焼危険性指標と、消火限界となる消防隊の到着時間を建物単位で推定した。

【第五章：消防活動モデル】

第五章では、大地震時の市街地被害状況下での消防活動のモデル化を行った。消防活動モデルは、①多発する火災の中から、どの火災現場へ出場するのかを決定する出場先決定モデルと、②市街地被害状況下での火災現場までの移動過程を記述する消防隊移動モデルから構成される。

【第六章：出場先決定支援と焼失棟数低減効果との関係】

第六章では、出場先決定戦略と非出場（放任）火災による焼失棟数との関係性を分析した。従来までは、深刻な被害をもたらす火災の発生に備えて、15 分程度待機する戦略が有力であった。しかし、この手法では、待機後に発生した深刻な火災に対応できない問題がある。そこで本研究では、第四章で構築した延焼危険性指標と出火確率を用いて、発生するであろう全火災中での通報された火災の相対的な延焼危険性を、統計的に予測する手法を構築した。次に、予測した延焼危険性により、危険な火災を特定し、即時出場することを提案した。提案手法では即時出場のみを行うため、待機により延焼が拡大することはない。加えて、全火災集合での危険性順位を予測するため、時間差を持って発生する火災への対応が可能となり、従来手法よりも大幅に焼失棟数を低減できることを示した。

【第七章：消防隊移動支援と延焼阻止との関係】

第七章では、消防隊の移動支援戦略と延焼阻止失敗に起因する焼失棟数との関係について分析した。まず、道路閉塞状況下であっても、道路閉塞を避けた適切な経路を通行できれば、到着時間の遅延が短いことを示した。次に、道路閉塞状況を把握するために、地域住民（自主防災組織等）による早期災害情報収集を提案し、その効果を検証した。さらに、東京都内では断水率が高くない地域が存在することから、断水状況下での消火栓の利用可能性について検討した。断水状況下であっても、水圧測定機器の導入等により、断水している消火栓を監視した場合には、ほぼ全ての管轄で焼失棟数を低減でき、大幅に焼失棟数を低減できる管轄が存在することも示した。

2. 今後の課題

本研究で構築した市街地被害シミュレーションモデルは、消防活動支援以外にも、救急・救命活動支援や広域避難シミュレーション、市街地の安全性評価等への応用が期待できる。現在、これらの連携を円滑に行うために、市街地被害シミュレーションの Web アプリケーションとその API を開発中である。この Web アプリケーションが完成すれば、例えば、発災直後に地震規模等にあわせて、最適な即時出場基準をリアルタイムに、各消防署へ伝達することも可能となると考えられる⁴⁶。他にも、シミュレーション結果を容易に分析できるため、効率的な市街地整備方針の検討等にも利用できる可能性がある⁴⁷。この Web アプリケーションを用いた、積極的な連携については今後の課題としたい。加えて、各章末に記してある、物理的な知見を加えた市街地被害モデルの精緻化や、近年発生した地震等における市街地被害モデルの検証等も今後の課題である。具体的には、以下のようになっている。

【データ整備における課題】

建物倒壊モデルの説明変数である実構造や建築年代の情報は、建物データに存在していないため、町丁目単位の詳細な集計量や建物単位の防火・耐火性能の情報等に基づき推定したうえで分析を行っている。また、市街地延焼に関しては、壁面の厚さや比重、開口部の比率等の詳細な建物や市街地データが入手可能となれば、説明変数も多く物理的な知見を取り入れたモデルを用いることで、高精度で推定できる可能性もある。このような詳細なデータの整備や防災・減災研究に対する提供体制等も含め、今後の課題といえるであろう。また、出火現象は、火気器具の使用率等の人間行動や火気器具の転倒、可燃物の落下等、様々な要因が複雑に関係するため、高精度での推定が困難である。建物内のセンサー情報や高所カメラ等のリアルタイム情報と連携し、出火現象の予測精度を向上させていくことも今後の課題である。

【市街地被害モデルの課題】

建物倒壊モデルに関しては、物理的な知見を取り入れたモデルが進展することで、推定精度が向上する可能性がある。道路閉塞モデルでは、放置車両やブロック塀等の影響が考慮されていないため、道路閉塞被害が過小に推定される傾向にある。断水シミュレーションモデルでは、代替路による配水可能性を考慮しておらず、破損度合いの大小による圧力変化に関しても考慮していない。これらを考慮した精緻なモデル化は今後の課題である。

⁴⁶ 更に即時出場基準の推定に伴う計算負荷は非常に低いため、市販されているような家庭用 PC であっても十分に計算が可能である。このことは、各消防署内のローカル端末でも計算が可能であることを示している。

⁴⁷ ただし、防災・減災という繊細なテーマであるために、セキュリティの都合等で、完全にオープンにはできない可能性がある。

上記のように市街地被害シミュレーションモデル等に、未だ改良の余地はあると考えられる。しかし、焼失棟数の発生メカニズムを考慮すると、発災後に待機し危険な火災に備えるという戦略（従来手法）では、待機後に発生した危険な火災に対応できないことや、待機中に延焼が進行することで、延焼阻止に失敗しやすくなる可能性があることに変わりはない。加えて、実社会においても提案手法のように、全火災集合での延焼危険性順位の予測に基づく出場先決定戦略が、有効に機能する可能性は高い。同様に到着時間の遅延メカニズムを考慮すると、緊急輸送道路のような重要道路の耐震化のみでは、火災現場付近の細街路を利用せざるを得ない、消防隊の移動を効率化することは困難であると考えられる。一方で、道路閉塞状況が判明した場合に、はじめから適切な経路を通行することで移動時間が短縮される可能性も高い。本研究の意義は、大地震時の同時多発火災のような、延焼危険性把握の困難さや、出火現象の確率的な揺らぎ、道路閉塞等の市街地被害状況等が複雑に絡み合う現象に対して、上記のような効果的な消防活動戦略を探索的かつ定量的に検証可能な点にあるといえるであろう。大地震時における防災・減災戦略は、今後の日本の将来を大きく左右する重要な課題である。特に、建築物の耐震化や不燃化に代表される防災計画は、災害に強いまちづくりの根幹をなすものであり、引き続き推進する必要がある。一方で、首都直下地震発生の切迫性を考慮すると、耐震化や不燃化と並行して、本研究で提案した出場先決定戦略や消防隊の移動支援戦略を実現し、減災や首都機能の迅速な復興に備えるべきである。近い将来、本研究の成果が実現され、首都直下地震における減災の一助となることに期待したい。

参考文献

- [1] 横須賀市医師会：災害時医療救護マニュアル，
<http://www.yokosukashi-med.or.jp/topics/saigaimanual/3.htm>（2017.4.21 参照）
- [2] 東京都：東京都における緊急輸送道路沿道建築物の耐震化を推進する条例，東京都耐震ポータルサイト，<http://www.taishin.metro.tokyo.jp/tokyo/ordinance.html>（2017.4.21 参照）
- [3] 藤井啓，糸井川栄一：地震火災時における消防機関の情報収集活動による戦略的な消防運用に関する研究，地域安全学会論文集，Vol.7，pp. 351-359，2005.11
- [4] 火災予防審議会：地震火災による人的被害の軽減方策，火災予防審議会答申，2015.4
- [5] 東京消防庁：東京都の地震時における地域別延焼危険度測定（第 8 回），
<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/hp-bousaika/enshoukiken/no08/>，2012.3（2017.4.21 参照）
- [6] 佐々木克憲，関澤愛：延焼予測と消防力運用のシミュレーションを利用した地震時の都市火災リスク評価に関する研究，日本火災学会論文集，Vol. 64，pp.29-37，2014.11
- [7] Rutger Claes, Tom Holvoet, and Danny Weyns : A Decentralized Approach for Anticipatory Vehicle Routing Using Delegate Multiagent Systems, IEEE transactions on intelligent transportation systems, Vol.12, No.2, pp.364-373, 2011.
- [8] 久貝壽之，加藤孝明・ヤルコン・ユスフ・小出治：道路閉塞からみた地区レベル街路網の防災性能評価手法の提案，地域安全学会論文集，No.1，pp.25-34，1999.11
- [9] 久貝壽之，加藤孝明・小出治：パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の防災性能評価に関する基礎研究，日本建築学会計画系論文集，No.549，pp.231-237，2001.11
- [10] 久貝壽之，加藤孝明：通行可能確率分布を考慮した道路網の防災性能評価手法の構築，パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の防災性能評価に関する基礎研究その 2，日本建築学会計画系論文集，No.593，pp.139-144，2005.7
- [11] 久貝壽之，加藤孝明：地域レベルの領域から道路網防災性能上脆弱な地区を抽出する評価手法の確立，パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の防災性能評価に関する基礎研究その 3，日本建築学会計画系論文集，No.600，pp.105-112，2006.2
- [12] 久貝壽之，加藤孝明：道路閉塞からみた道路網防災性能の構造の解明，パーコレーション理論に基づいた地区レベル道路網の防災性能評価に関する基礎研究その 4，日本建築学会計画系論文集，No.615，pp.113-120，2007.5
- [13] Zhiyong Wang, and Sisi Zlatanova : Multi-agent based path planning for first responders among moving obstacles, Computers, Environment and Urban Systems 56, pp. 48-58, 2016
- [14] 高田至朗，勤域義弘，楢田泰子：火災延焼による人的被害波及と水道消火栓機能，日本地震工学会論文集，Vol.5，No.2，pp.1-15，2005.3

- [15] 東京都：首都直下地震等による東京の被害想定，
<http://www.bousai.metro.tokyo.jp/taisaku/1000902/1000401.html>, 2012.4 (2017.4.17 参照)
- [16] 若松加寿江，松岡昌志：地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版の構築，日本地震工学会大会－2008 梗概集，pp.222-223，2008.11
- [17] 藤本一雄，翠川三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定，日本地震工学会論文集，Vol.3，No.3，pp.13-27，2003.7
- [18] 松岡昌志，若松加寿江：地形・地盤分類 250m メッシュマップ全国版に基づく地盤のゆれやすさデータ，産業技術総合研究所，知的財産管理番号 H20PRO-936，2008
- [19] 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング，No.22 回地盤震動シンポジウム資料集，日本建築学会，pp.23-24，1994.10
- [20] 秋山祐樹，小川芳樹，仙石裕明，柴崎亮介，加藤孝明：マイクロジオデータを活用した大規模地震時における国土スケールの災害リスク評価のためのミクロな空間データ基盤整備，CSIS DAYS 2014 研究アブストラクト集，p.44，2014.
- [21] 秋山祐樹，小川芳樹，仙石裕明，柴崎亮介，加藤孝明：大規模地震時における国土スケールの災害リスク・地域災害対応力評価のためのミクロな空間データの基盤整備，第 47 回土木計画学研究・講演集 (CD-ROM, 392)，2013
- [22] Ogawa, Y., Akiyama, Y. and Shibasaki, R., 2013, "The Development of Method to Evaluate the damage of Earthquake Disaster Considering Community-based Emergency Response Throughout Japan", GI4DM2013, TS03-1.
- [23] Ogawa, Y., Akiyama, Y. and Shibasaki, R., 2013, "Evaluation of Catastrophic Earthquake Damage throughout Japan using Estimated Micro Data", CUPUM2013 conference papers, 103.
- [24] 小林朋美，山崎文雄，丸山喜久：道路網の GIS データに基づく上水道管路の分布推定，地域安全学会論文集，No.21，pp.267-274，2013.11
- [25] 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，No.523，pp. 63-70，1999.9
- [26] Midorikawa, S., Matsuoka, M., and Sakugawa, K. : Site effects on strong motion records observed during the 1987 Chiba-Ken-Toho-Okai, Proceeding of 9th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1994
- [27] 藤本一雄，翠川三郎：近年の共振記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法，地域安全学会論文集，Vol. 7，pp.241-246，2005.11
- [28] Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima : A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bulletin of Seismological Society of America, vol.96, pp. 879-897, 2006.6
- [29] 村尾修，山崎文雄：兵庫県南部地震における建物被害の自治体による調査法の比較検討，日本建築学会計画系論文集，No.515，pp.187-194，1999.1
- [30] 村尾修，山崎文雄：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数，日本建築学会構造系論文集，No.527，pp.189-196，2000.1
- [31] 林 康裕，鈴木 祥之，宮腰 淳一，渡辺 基史：耐震診断結果を利用した既存 RC 造建築物の地震リスク表示，地域安全学会論文集，No.2，pp.235-242，2000.11
- [32] 林 康裕：性能等価応答スペクトルに基づく建築物の地震荷重評価，2002 年日本地震工

- 学シンポジウム, pp.651-656, 2002.11.
- [33] 時松 孝次, 新井 洋, 関口 徹: 2004 年新潟県中越地震時に表層地盤の非線形震動増幅特性が小千谷の木造住宅被害に与えた影響, 日本建築学会構造系論文集, No. 620, pp. 35-42, 2007.10
- [34] 東京都: 地震に関する地域危険度測定調査 (第 7 回),
http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_6/home.htm, 2013.9 (2016.3.20 参照)
- [35] 家田仁, 望月拓郎, 上西周子: 地震時に建築物の倒壊等によって生じる街路閉塞の危険度評価法, 国際交通安全学会誌, Vol.23, No.3, pp.138-145, 1998.2
- [36] 市川 総子, 阪田 知彦, 吉川 徹: 道路閉塞による避難経路の危険性を考慮した避難地の配置に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概, pp.489-490, 2001.7
- [37] 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「まちづくりにおける防災評価・対策技術の開発」, 2003
- [38] 薄井宏行, 浅見泰司: GIS を用いた建物敷地の接道判定方法に関する研究, CSIS Discussion paper, No.95, 2009.4
- [39] 川瀬博: 断層近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能～1995 年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ～, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, パネルディスカッション資料集, pp.29-34, 1998
- [40] 財団法人水道技術研究センター: 地震による水道管路被害予測の手引き, 管路更新手法の開発に関する研究 地震による管路被害の予測等 報告書, 2011.3
- [41] 東京都水道局: 東京の水道水源と浄水場別給水区域,
<https://www.waterworks.metro.tokyo.jp/suigen/map.html>, 2016.3 (2017.5.14 参照)
- [42] 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, 火災予防審議会答申, 1997
- [43] 火災予防審議会: 地震時における人口密集地域の災害危険要因の解明と消防対策について, 火災予防審議会答申, 2005.3
- [44] 火災予防審議会: 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, 火災予防審議会答申, 2001.3
- [45] 樋本圭佑, 田中孝義: 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, Vol.71, No.607, pp.15-22, 2006.9
- [46] 岩見達也, 大宮喜文, 林吉彦, 成瀬友宏, 竹谷修一, 鍵屋浩司, 糸井川栄一, 加藤孝明, 志田弘二, 北後明彦, 高橋済: 市街地の延焼危険性評価手法の開発, 独立行政法人建築研究所, 建築研究報告, No.145, pp.1-66, 2006.2
- [47] 加藤孝明, 程洪, 垂力坤玉素甫, 山口亮, 名取 晶子: 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, Vol.8, pp.279-288, 2006.11
- [48] 大佛俊泰, 沖拓弥: リアルタイム災害情報収集・共有・活用システムの開発, 日本建築学会計画系論文集, Vol.82, No.739, pp.2451-2459, 2017.9
- [49] 杉井完治, 関沢愛, 岡部弘志, 遠藤真, 座間信作, 新井場公德: 震災直後期における

消防機関による実効性のある災害情報収集体制構築の必要性, 地域安全学会論文集,
No.10, pp.89-96, 2008.11

[50] 日本経済新聞：大地震 水道復旧早く, 2016.9.9

関連する研究業績

学術雑誌発表論文（査読あり）

- [1] 大佛俊泰, 廣川典昭, 沖拓弥: 大地震時における消防隊の到着時間からみた道路閉塞情報収集の有効性, 日本建築学会計画系論文集, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 80, No. 709, pp. 465-473, 2015.3 (第二章・第五章・第七章に関連)
- [2] Hirokawa, Noriaki and Osaragi, Toshihiro: Earthquake Disaster Simulation System: Integration of Models for Building Collapse, Road Blockage, and Fire Spread, Journal of Disaster Research, Vol.11, No.2, pp. 175-187, 2016.3 (第二章・第四章に関連)
- [3] 廣川典昭, 大佛俊泰: 同時多発火災を想定した大規模延焼シミュレーションに基づく延焼危険性指標の提案と消防隊行動支援への活用, 日本建築学会計画系論文集, Vol.82, No.732, pp.301-310, 2017.2 (第四章・第五章・第六章に関連)
- [4] Osaragi, Toshihiro and Hirokawa, Noriaki: Simulation Analysis of Fire Brigade Action Strategies during Multiple Simultaneous Fires, Journal of Disaster Research, Vol.12, No.2, pp. 311-319, 2017.3 (第四章・第五章・第六章に関連)
- [5] 廣川典昭, 大佛俊泰: 大地震時における消火栓の利用可能性に関するシミュレーション分析, 日本建築学会計画系論文集, Vol.82, No.739, pp. 2185-2195, 2017.9 (第三章・第五章・第六章・第七章に関連)

国際会議における発表（査読あり）

- [1] Hirokawa, Noriaki and Osaragi, Toshihiro: Access Time of Emergency Vehicles Under the Condition of Street Blockages After a Large Earthquake, First International Conference on Smart Data and Smart Cities, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. IV-4/W1, pp. 37-44, 2016.9 (第二章・第五章・第七章に関連)

国際会議における発表（査読なし）

- [1] Hirokawa, Noriaki, Toshihiro Osaragi, Takuya Oki: Information Collection of Street Blockage after a Large Earthquake for Reducing Access Time of Firefighters, The 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management, May. 2015. (第二章・第五章・第七章に関連)

国内会議における発表（査読なし）

- [1] 廣川典昭, 大佛俊泰, 沖拓弥: 大地震時の道路閉塞が緊急車両到着時間に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会, Vol. E-1, pp. 121-122, 2013.8 (第二章・第五章・第七章に関連)
- [2] 廣川典昭, 大佛俊泰, 沖拓弥: 大地震時における道路閉塞情報の獲得が緊急車両到着時間短縮に及ぼす影響, 地理情報システム学会学術講演発表会, 地理情報システム学会講演論文集 (CD-ROM), 地理情報システム学会, Vol. 22, 2013.10 (第二章・第五章・第七章に関連)
- [3] 廣川 典昭, 大佛 俊泰, 沖 拓弥: 緊急車両到着時間短縮における大地震時道路閉塞情報収集の効果, 日本建築学会大会学術講演会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会, pp. 81-82, 2014.9 (第二章・第五章・第七章に関連)
- [4] 廣川典昭, 大佛俊泰, 沖拓弥: 道路閉塞情報の緊急車両到着時間短縮効果とその地域特性, 地理情報システム学会学術講演発表会, 地理情報システム学会講演論文集 (CD-ROM), 地理情報システム学会, Vol. 23, 2014.11 (第二章・第五章・第七章に関連)
- [5] 廣川典昭: 大地震時における早期災害情報収集の緊急車両到着時間短縮効果, 第11回都市住宅学会 東北・関東支部学生論文コンテスト, 都市住宅学会, 2015.3 (第二章・第五章・第七章に関連)
- [6] 廣川 典昭, 大佛俊泰: 延焼危険性指標としての延焼ポテンシャルの提案と応用 大地震時における消防活動支援に関する研究 その1, 日本建築学会大会学術講演会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会, pp. 245-246, 2015.9 (第四章・第五章・第六章に関連)
- [7] 廣川典昭, 大佛俊泰: 延焼危険性指標の提案と消防隊行動支援への応用, 地理情報システム学会学術研究発表大会, 地理情報システム学会講演論文集 (CD-ROM), 地理情報システム学会, Vol. 24, 2015.10 (第四章・第五章・第六章に関連)
- [8] 廣川典昭, 大佛俊泰: 大規模延焼シミュレーションに基づく建物焼失危険性指標の提案, 日本建築学会大会学術講演会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会, pp. 419-420, 2016.8 (第四章に関連)
- [9] 廣川典昭, 大佛俊泰: 大規模延焼シミュレーションに基づく消防隊行動支援方法の提案, 地理情報システム学会学術研究発表大会, 地理情報システム学会講演論文集 (CD-ROM), 地理情報システム学会, Vol. 25, 2016.10 (第四章・第五章・第六章に関連)
- [10] 廣川典昭, 大佛俊泰: 大地震時を想定した消火栓断水シミュレーションモデル, 日本建築学会大会学術講演会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会, pp.79-80, 2017.8 (第三章・第五章・第七章に関連)

受賞暦

地理情報システム学会 優秀発表賞, 2013.10

東京工業大学 建築学科同窓会 冬夏賞, 2014.1

日本建築学会 若手優秀発表, 2014.9

東京工業大学 情報環境学専攻賞, 2015.3

都市住宅学会 学生論文コンテスト 修士論文部門最優秀賞, 2015.3

ESRI ジャパン株式会社 Esri Young Scholars Award, 2015.5

日本建築学会 若手優秀発表, 2015.10

東京工業大学 建築学科同窓会 冬夏賞, 2016.1

日本建築学会 若手優秀発表賞, 2016.10