

火災情報の不完全性を考慮した
地震火災時のリアルタイム避難誘導に関する
基礎的研究

2021年 3月

鈴木 雄太

火災情報の不完全性を考慮した
地震火災時のリアルタイム避難誘導に関する
基礎的研究

鈴木 雄太

システム情報工学研究科
筑波大学

2021年 3月

目次

第1章 序論	2
1.1 研究の背景と目的.....	2
1.2 関連研究と本研究の位置づけ.....	5
1.2.1 最遅避難理論.....	6
1.2.2 地震火災時の延焼拡大予測.....	7
1.2.3 潜在的な火災リスクと避難リスクの評価.....	8
1.2.4 潜在的なリスクを考慮した事前的な避難計画.....	10
1.2.5 避難シミュレーションによる避難行動解析.....	10
1.2.6 本研究の位置づけ.....	12
1.3 研究の構成.....	14
第2章 火災情報の不完全性を考慮した動的誘導経路による火災遭遇リスクに対する頑健化	16
2.1 本章の目的と構成.....	16
2.2 不完全情報下における火災遭遇リスクに対して頑健な避難誘導方策.....	17
2.2.1 避難の定義と地震火災時の避難誘導に関するシナリオ.....	17
2.2.2 火災への遭遇可能性による避難誘導の頑健性の定義.....	21
2.2.3 火災に遭遇しにくい誘導経路の方針と動的更新による避難誘導の頑健化.....	21
2.3 未覚知火災への遭遇しにくさを最大化する避難経路選択モデル(P 最大経路).....	22
2.3.1 問題設定.....	22
2.3.2 覚知火災情報を考慮した避難可能確率の導出.....	27
2.3.3 避難可能確率の最大化による避難経路選択.....	30
2.4 延焼予測のばらつきに対して余裕を最大化する避難経路選択モデル(最大余裕経路).....	33
2.4.1 問題設定.....	33
2.4.2 避難余裕性の導出.....	34
2.4.3 避難余裕性の最小値最大化による避難経路選択.....	35
2.5 避難余裕性の確保を考慮した避難可能確率最大化(M*-P 最大経路).....	37
2.6 避難経路の動的更新による頑健化.....	39
2.6.1 情報伝達の分類による避難情報伝達モデル.....	39
2.6.2 避難情報の伝達時間を考慮した動的な避難情報更新モデル.....	42
2.7 小括.....	44

第3章 リアルタイム避難誘導シミュレーションによる動的誘導経路の火災遭遇リスク低減効果の検証	46
3.1 本章の目的と構成.....	46
3.2 リアルタイム避難誘導シミュレーション.....	47
3.2.1 地震火災シミュレーション.....	48
3.2.2 覚知情報シミュレーション.....	50
3.2.3 避難行動シミュレーション.....	54
3.2.4 シミュレーション実験の流れ.....	55
3.3 モンテカルロ法による避難誘導効果の評価指標.....	58
3.3.1 避難開始時における経路情報の評価.....	58
3.3.2 火災遭遇率.....	59
3.4 実験の概要.....	60
3.4.1 実験の目的.....	60
3.4.2 避難圏域の市街地モデル –格子状市街地–.....	60
3.4.3 実験条件.....	61
3.5 格子状市街地における動的誘導経路の効果検証.....	62
3.5.1 避難開始時刻に対する避難可能確率の推移.....	62
3.5.2 動的更新による火災遭遇リスクの低減効果.....	64
3.5.4 検証結果のまとめ.....	65
3.6 小括.....	66
第4章 大井競馬場・しながわ区民公園一帯を対象とした動的誘導経路のケーススタディ	68
4.1 本章の目的と構成.....	68
4.2 避難圏域の実市街地モデル –大井競馬場・しながわ区民公園一帯–.....	69
4.3 避難経路の特徴.....	75
4.3.1 実験の目的.....	75
4.3.2 実験条件.....	75
4.3.3 避難可能確率の妥当性検証.....	77
4.3.4 避難経路の視覚的特徴の考察.....	78
4.3.5 避難経路規範別の避難余裕性の比較.....	83
4.3.6 避難経路の特徴のまとめ.....	85
4.4 動的更新による火災遭遇リスクの低減効果.....	86
4.4.1 実験の目的.....	86
4.4.2 実験条件.....	86
4.4.3 動的更新の有無による火災遭遇率の比較.....	87
4.5 小括.....	89

第5章 最遅避難時刻の不確実性を考慮した避難開始時期決定モデルによる見逃しリスクに対する頑健化	91
5.1 本章の目的と構成.....	91
5.2 避難時期を見逃さないための避難開始時期決定方法の枠組み.....	93
5.2.1 本章で想定する避難開始時期のシナリオ.....	93
5.2.2 自由避難モデルによる避難誘導の頑健性の再定義.....	95
5.2.3 避難開始時期の見逃しを防ぐための避難開始時期決定方法の方針.....	97
5.3 許容リスクに基づく安全避難開始時刻の設定.....	100
5.3.1 最遅避難時刻比による避難開始時刻の評価.....	100
5.3.2 上側避難と下側避難.....	101
5.3.3 許容リスクに対する安全避難比による安全避難開始時刻の設定.....	102
5.4 事前リスク評価に基づく事前計画避難時刻.....	103
5.4.1 シミュレーション実験に基づく最遅避難時刻の確率的評価.....	103
5.4.2 最遅避難の確率分布による避難開始時刻の設定.....	103
5.4.3 事前計画避難に期待される避難開始時期の特徴.....	104
5.5 連結信頼性に基づく勧告避難の決定判断.....	105
5.5.1 連結信頼性による最遅避難確率の評価.....	105
5.5.2 最遅避難確率に基づく避難勧告の決定判断.....	106
5.5.3 避難可能確率の厳密解算出における問題点.....	106
5.5.4 ミニマルパスセットの構築手法.....	107
5.5.5 モンテカルロ法による最遅避難確率の評価手法.....	111
5.5.6 勧告避難に期待される避難開始時期の特徴.....	112
5.6 許容リスクに基づく避難開始時刻の遅延化.....	113
5.6.1 避難開始時刻を遅延化する意義.....	113
5.6.2 許容リスクを所与とした避難開始時刻の遅延化.....	113
5.7 小括.....	114
第6章 避難開始時期決定モデルによる見逃しリスク低減効果の検証	116
6.1 本章の目的と構成.....	116
6.2 自由避難によるリアルタイム避難誘導シミュレーションの拡張.....	117
6.2.1 自由避難モデル.....	117
6.2.2 火災状況に合わせた避難開始時期の変更.....	117
6.2.3 避難誘導シミュレーションの流れ.....	118
6.3 モンテカルロ法による避難誘導効果の評価指標.....	120
6.3.1 避難成功率.....	120
6.3.2 最遅避難時刻比.....	120
6.3.3 避難開始時刻.....	121

6.4 実験の概要	122
6.4.1 実験目的.....	122
6.4.2 実験条件.....	122
6.5 事前計画避難のための最遅避難時刻の事前評価	124
6.5.1 基本ケースの分析.....	124
6.5.2 各パラメータと最遅避難時刻の関係	126
6.6 安全避難比の事前評価.....	128
6.6.1 基本ケースの分析.....	128
6.6.2 各パラメータと安全避難比の関係	131
6.7 事前計画避難と勧告避難の最遅避難時刻比.....	134
6.7.1 基本ケースの分析.....	134
避難開始時刻決定の適用範囲の問題 -	138
6.7.2 安全避難比が1.0に近い場合の影響	138
6.8 許容リスクに基づく避難開始時刻の遅延化評価	140
6.8.1 マップによる許容リスクを満たす避難開始時刻の特定.....	140
6.8.2 基本ケースの分析.....	141
6.8.3 各パラメータと避難開始時刻の関係	145
6.9 小括	148

第7章 大井競馬場・しながわ区民公園一帯を対象とした避難開始時期決定モデルのケーススタディ

7.1 本章の目的と構成.....	151
7.2 避難開始時刻決定モデルのための事前評価	152
7.2.1 実験の目的.....	152
7.2.2 実験条件.....	152
7.2.3 事前計画避難時刻のための最遅避難時刻の確率分布.....	153
7.2.4 避難経路規範別の安全避難開始時刻の比較	155
7.3 避難開始時期決定モデルにおける最遅避難時刻比の特徴	162
7.3.1 実験の目的.....	162
7.3.2 実験条件.....	162
7.3.3 事前計画避難における最遅避難時刻比の特徴	162
7.3.4 勧告避難における最遅避難時刻比の特徴	164
7.4 許容リスクを満たす避難開始時刻の遅延化の検証	166
7.4.1 実験の目的と条件.....	166
7.4.2 避難経路規範による比較.....	167
7.4.3 覚知確率による比較.....	169
7.5 小括	172

第 8 章 結論	174
8.1 本研究の結論	174
8.2 リアルタイム避難誘導體制の実現に向けた提言	179
8.3 今後の課題	181

参考文献

付録 7.3 節における避難開始時刻・避難成功率マップ

目録

謝辞

目次

図 1-1 兵庫県南部地震における 8 時間後までの累積出火件数と累積覚知件数の推移	4
図 1-2 地震火災時におけるリアルタイム避難誘導の流れ	5
図 1-3 リアルタイム避難誘導における本研究の適用範囲	12
図 2-1 不完全情報下における完全情報下の避難リスクと頑健な避難経路の方針	21
図 2-2 時刻 T_3 に避難開始する場合における OP 上の点 P で火災に遭遇する条件	23
図 2-3 時刻 T_3 に避難開始する場合の出火警戒領域	23
図 2-4 出火時刻が地震発生から避難完了までの出火に対する出火警戒領域の推移	26
図 2-5 地震発生から避難完了までの出火警戒領域の重ね合わせのイメージ	27
図 2-6 地震発生から避難経路判断時までの出火警戒領域の重ね合わせのイメージ	28
図 2-7 道路リンクの両端点の状態を考慮した出火警戒領域の形状 ($0 < T < T_3$)	29
図 2-8 避難経路における避難可能確率の計算イメージ	32
図 2-9 延焼予測誤差の許容限界に対する火災前線	33
図 2-10 避難経路の避難余裕性と最大余裕経路の考え方	36
図 2-11 P 最大経路・最大余裕経路・M*-P 最大経路における頑健性の特徴の違い	38
図 2-12 必要余裕性を考慮した避難可能確率最大経路の模式図	38
図 2-13 PUSH 型による避難開始時の避難情報伝達	39
図 2-14 PUSH 型の避難経路更新	40
図 2-15 PULL 型における避難開始時の避難情報伝達	40
図 2-16 PULL 型の避難経路更新	41
図 2-17 避難途上における新経路の更新フロー	42
図 2-18 避難途上における避難経路の動的更新の模式図	43
図 3-1 リアルタイム避難誘導シミュレーションの全体像	47
図 3-2 地震発生後の経過時間に対する出火件数比率・覚知件数比率	53
図 3-3 避難誘導シミュレーションの流れ	57
図 3-4 格子状市街地	60
図 3-5 避難可能確率と火災遭遇率の関係	62
図 3-6 動的更新による火災遭遇率の低減効果	64
図 4-1 避難ネットワークの模式図	69
図 4-2 延焼クラスターと通行不能領域の関係図	72
図 4-3 実市街地における通行不能領域の生成例：非耐火造建物の選択	72
図 4-4 実市街地における通行不能領域の生成例：延焼限界距離に基づく延焼クラスター	73
図 4-5 実市街地における通行不能領域の生成例：避難不能距離に基づく通行不能領域	73
図 4-6 大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域における通行不能領域	74
図 4-7 対象とする避難開始地点と避難場所	76

図 4-8 平均避難可能確率と火災遭遇率の関係	77
図 4-9 2 時間後の覚知状況における避難経路(覚知確率 R=0.5)	78
図 4-10 避難開始時刻に対する平均避難可能確率の推移(中延四丁目)	81
図 4-11 避難開始時刻に対する平均避難可能確率の推移(西大井四丁目).....	81
図 4-12 避難開始時刻に対する平均避難可能確率の推移(西大井一丁目).....	81
図 4-13 避難開始時刻に対する平均避難可能確率の推移(東大井五丁目).....	82
図 4-14 避難開始時刻に対する平均避難可能確率の推移(南大井五丁目).....	82
図 4-15 避難開始時刻に対する避難余裕性の推移(中延四丁目)	83
図 4-16 避難開始時刻に対する避難余裕性の推移(西大井四丁目).....	84
図 4-17 避難開始時刻に対する避難余裕性の推移(西大井一丁目).....	84
図 4-18 避難開始時刻に対する避難余裕性の推移(東大井五丁目).....	84
図 4-19 避難開始時刻に対する避難余裕性の推移(南大井五丁目).....	84
図 4-20 動的更新の有無による非火災遭遇率の比較(中延四丁目,避難開始時刻=1[H])	87
図 4-21 動的更新の有無による非火災遭遇率の比較(中延四丁目,避難開始時刻=2[H])	88
図 4-22 動的更新の有無による非火災遭遇率の比較(中延四丁目,避難開始時刻=3[H])	88
図 5-1 避難開始時期のシナリオ	93
図 5-2 自由避難モデルの避難過程	96
図 5-3 避難の見逃しを防ぐための避難開始時期の決定方針の全体像.....	99
図 5-4 出火パターンによる避難経路への影響	101
図 5-5 安全避難比のイメージ	102
図 5-6 事前計画避難の避難開始時刻に期待できる最遅避難時刻比の特徴.....	104
図 5-7 K 回目の勧告判断時におけるミニマルパスセットの構築フロー	107
図 5-8 ミニマルパスセット探索における各リンクの使用可能回数	108
図 5-9 勧告避難の決定判断におけるミニマルパスセットの更新フロー	110
図 5-10 モンテカルロ法による最遅避難確率の推定フロー	111
図 5-11 勧告避難による避難開始時刻に期待できる最遅避難時刻比の特徴.....	112
図 5-12 避難開始時刻決定の流れ.....	113
図 6-1 自由避難・避難開始時刻の逐次変更を反映した避難誘導シミュレーションの流れ	119
図 6-2 地震火災基本ケース(CASE-2)における最遅避難時刻の累積分布.....	125
図 6-3 避難基本ケース(CASE-7)における最遅避難時刻の累積分布	125
図 6-4 期待出火件数密度と最遅避難時刻の関係	126
図 6-5 延焼速度と最遅避難時刻の関係	126
図 6-6 歩行速度と最遅避難時刻の関係	127
図 6-7 避難場所までの距離と歩行速度と最遅避難時刻の関係.....	127
図 6-8 地震火災基本ケースにおける最遅避難時刻比と避難成功率の関係.....	129
図 6-9 避難基本ケースにおける最遅避難時刻比と避難成功率の関係	129
図 6-10 期待出火件数密度と安全避難比の関係	131
図 6-11 延焼速度と安全避難比の関係.....	131

図 6-12 歩行速度と安全避難比の関係.....	132
図 6-13 避難場所からの距離と安全避難比の関係.....	132
図 6-14 覚知確率と安全避難比の関係.....	133
図 6-15 地震火災基本ケースにおける事前計画避難の最遅避難時刻比.....	135
図 6-16 避難基本ケースにおける事前計画避難の最遅避難時刻比.....	135
図 6-17 地震火災基本ケースにおける勧告避難の最遅避難時刻比.....	136
図 6-18 避難基本ケースにおける勧告避難の最遅避難時刻比.....	136
図 6-19 「安全避難比=0.9」における事前計画避難の最遅避難時刻比.....	138
図 6-20 「安全避難比=0.9」における勧告避難の最遅避難時刻比.....	138
図 6-21 最遅避難閾確率に対する最遅避難時刻の見逃し率の推移.....	139
図 6-22 避難開始時刻－避難成功率マップ.....	140
図 6-23 地震火災基本ケースにおける避難開始時刻－避難成功率マップ.....	141
図 6-24 地震火災基本ケースにおける許容リスクを満たす避難開始時刻.....	142
図 6-25 避難基本ケースにおける避難開始時刻－避難成功率マップ.....	143
図 6-26 避難基本ケースにおける許容リスクを満たす避難開始時刻.....	144
図 6-27 期待出火件数密度と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係.....	145
図 6-28 延焼速度と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係.....	145
図 6-29 歩行速度と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係.....	146
図 6-30 避難場所までの距離と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係.....	146
図 6-31 覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係.....	147
図 7-1 地震発生後の経過時刻に対する最遅避難時刻の累積分布.....	154
図 7-2 地震発生後の経過時刻に対する最遅避難時刻の累積分布($P \leq 0.2$).....	154
図 7-3 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移(覚知確率=0.7, 全体).....	156
図 7-4 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移(覚知確率=0.7, 全体, 避難成功率 ≥ 0.9).....	156
図 7-5 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移(覚知確率=0.7, 下側避難).....	157
図 7-6 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移 (覚知確率=0.7, 下側避難, 避難成功率 ≥ 0.9).....	157
図 7-7 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移(覚知確率=0.7, 上側避難).....	158
図 7-8 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移 (覚知確率=0.7, 上側避難, 避難成功率 ≥ 0.9).....	158
図 7-9 覚知確率に対する安全避難比の推移(全体, 許容リスク=0.01).....	160
図 7-10 覚知確率に対する安全避難比の推移(下側避難, 許容リスク=0.01).....	160
図 7-11 覚知確率に対する安全避難比の推移(上側避難, 許容リスク=0.01).....	160
図 7-12 覚知確率に対する安全避難比の推移(全体, 許容リスク=0.05).....	161
図 7-13 覚知確率に対する安全避難比の推移(下側避難, 許容リスク=0.05).....	161
図 7-14 覚知確率に対する安全避難比の推移(上側避難, 許容リスク=0.05).....	161
図 7-15 事前計画避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.21).....	163
図 7-16 事前計画避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.71).....	163

図 7-17 事前計画避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.90)	163
図 7-18 勧告避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.21, 覚知確率=0.7)	165
図 7-19 勧告避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.71, 覚知確率=0.9)	165
図 7-20 勧告避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.90, 覚知確率=1.0)	165
図 7-21 許容リスクを満たす避難開始時刻(覚知確率=0.5)	167
図 7-22 許容リスクを満たす避難開始時刻(覚知確率=0.7)	168
図 7-23 許容リスクを満たす避難開始時刻(覚知確率=0.9)	168
図 7-24 許容リスクを満たす避難開始時刻(覚知確率=1.0)	168
図 7-25 覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係(自由避難)	169
図 7-26 覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係(P 最大経路)	170
図 7-27 覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係($M^*(0.5)$ -P 最大経路)	171
図 7-28 覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係($M^*(1.0)$ -P 最大経路)	171

表目次

表 1-1 先行研究のリアルタイム情報システムとの比較.....	13
表 2-1 PUSH 型・PULL 型における覚知時刻から避難情報更新までのタイムラグ	41
表 3-1 シミュレーションケースにおけるパラメータ	55
表 3-2 避難誘導規範.....	56
表 3-3 シミュレーション結果の評価対象	56
表 3-4 実験パラメータ	61
表 4-1 実験条件	75
表 4-2 対象とする避難経路及び論文上での表記	76
表 4-3 避難開始地点別・避難経路別の避難可能確率, 避難余裕性, 経路長の比較	78
表 4-4 実験条件	86
表 6-1 避難誘導規範.....	118
表 6-2 実験ケースとパラメータ	123
表 6-3 基本ケースにおける安全避難比.....	130
表 7-1 実験条件	152
表 7-2 最遅避難時刻の確率分布に関する基本統計量	153
表 7-3 避難経路規範別の安全避難比(覚知確率=0.7)	155

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

我が国において、首都直下地震や南海トラフ巨大地震等、巨大地震の発生が危惧されている。現代の都市には、木造住宅密集地域と呼ばれる火災に対する脆弱性の高い地域が今なお多く存在しており、巨大地震時には甚大な火災被害が懸念される。平常時の市街地火災事例では、2016年12月22日に新潟県糸魚川市で発生した糸魚川市大規模火災([新潟県 2016])が記憶に新しいが、地震時となると、木造住宅密集地域内の至る所で同時多発的に火災が発生し、多方向から市街地を覆うように延焼拡大する火災が予想されている。こうした大地震後の同時多発的な火災(以下「地震火災」)では、甚大な人的被害が生じるとされている。東京都による首都直下地震の被害想定によると、地震火災による被害者数は、最も被害の大きい冬の夕方18時のケースにおいて死者4081人・負傷者17709人と甚大な被害者数が想定されている([東京都 2013])。その被害の主要因は「延焼拡大時の逃げ惑い」とされているが、その根拠となる死者数の算定は、過去の震災被害のデータから統計的に推計しており、逃げ惑いのメカニズム自体は明らかにされておらず、現代都市に適用されるものかも明らかにされていない。

[久松, 伯野 1972]による関東大震災の調査では、地震火災時の逃げ惑いによる死者は、地震発生後、十分に経過した後によく発生するとされている。不燃化が進んだ現代都市では、地震火災の延焼拡大は遅く、ある程度の時間まで避難が可能であることが予想できる。先行研究では、一部の避難圏域を対象として、住民の避難行動を記述した地震火災避難の計算シミュレーション実験を行い、地震火災避難の特性把握が行われている。加藤の実験([加藤 2016])では、出火点配置が異なるシミュレーション実験を3000回試行した結果、悪条件が重なることによって、避難失敗による被災者が多く発生する極端なケースが確認されている。大佛・沖の実験([大佛, 沖 2012])では、避難者に徒歩帰宅者を加え、時間帯による被害の違いを明らかにしている。いずれも、避難者個人の自由意思に任せた避難開始決定や経路選定による避難を前提としている。また、増山・李・梶の一連の研究([増山, 梶 1984] [増山, 梶 1985] [李, 梶 1992])によって提唱された最遅避難理論に基づいて、確率的に避難リスクを求めた渋谷・糸井川の研究([渋谷, 糸井川 2016])では、全ての火災、地震発生後全ての火災を把握し最適な経路選択を行ったとしても、地震発生後3時間程度で避難不能となる確率が高い地域の存在を示唆している。以上のように、先行研究の実験において、不燃化が進行している現代都市においても火災に対する逃げ惑いによる被害の発生可能性が示唆されている。住民の自由意思に任せた避難には、個人には認知できない複雑な出火状況や延焼範囲による逃げ惑いや、無自覚なまま避難不能を迎えるなど安全性に課題があると言える。

一方、東京都を代表とする大都市では地震火災に対する減災を目的として、市街地の不燃化・難燃化による火災に強い都市整備を推進している([東京都都市整備局 2016])。しかしながら、こうした都市整備による対策は非常に長い時間を要するため、30年以内に高確

1.1 研究の背景と目的

率で発生するとされる首都直下地震や南海トラフ巨大地震の発災時に、都市の安全を十分に確保することは困難である。これに対して、火災の輻射熱に対して工学的手法によって安全が検証されている避難場所の指定と避難者数等を考慮した避難圏域の設定による広域避難対策が講じられることで([東京都 2013]), ハードとソフトの双方による総合的な火災に強いまちづくりが進められている。ただし、地震火災時の不確実な出火状況に対して、実際に避難が可能かどうかについては十分な検証がなされていない。

そこで重要となるのが、地震後の火災状況に対応して“その時に”火災に対して危険な住民を、安全な場所へ・安全な避難経路で誘導する応急対策の検討が、事前対策のフェールセーフ機構として重要であると考えられる。以上の要請に対して、消防機関等によって収集される火災情報(以下「覚知火災情報」)に基づき、火災に対して安全な避難経路と適切な避難開始時刻で住民の避難を支援するリアルタイム避難誘導方法について検討されている。建築研究所([建築研究所 1989])は、地震時の情報処理システムの一部として、最遅避難理論([増山, 梶 1984] [増山, 梶 1985] [李, 梶 1992])に従い、火災に対して安全に避難可能な最も遅い限界時刻とそれを実現する避難経路による避難誘導を提案している。ただし、建築研究所のシステムは、ある程度経過した時点において全出火点を把握し、把握した火災のついて正確な延焼拡大の将来予測が可能であることを前提としている。そのため、地震発生後の充実した火災情報収集体制が必要不可欠であると言える。

近年では、ICT による効果的な火災情報の収集・活用に関する試みもなされている。東京消防庁では第 23 期火災予防審議会([東京消防庁 2018])において、地震発生後に消防機関等によって収集される火災情報の効果的な活用方策について検討されている。災害情報の伝達過程を、収集・加工・伝達・受容に分けて東京消防庁の役割について整理し、火災情報の収集について、住民の駆けつけ通報による火災情報の覚知能力の評価、ヘリを併用した覚知能力の向上効果について検証している。また、内閣府が主導する「戦略的イノベーション創造プログラム」の一環として、SIP4D(Shared Information Platform for Disaster Management)と呼ばれる公的機関の災害情報支援を目的として、あらゆる災害対応現場の各機関が保有するデータの双方向による情報共有を行う情報統合システムが開発されている([防災科学技術研究所 2019])。SIP4D では、事前のハザード情報から災害時の被害状況、避難所対応、物資対応等、汎用かつ拡張性を有し幅広く災害情報を共有できる仕組みとなっている。地震火災時の災害情報についても SIP4D において対応が進められており、地震火災予測を SIP4D に取り込む研究開発が進行している。以上のように、近年の ICT の技術発展によって、収集された火災情報を幅広く活用する方策検討が盛んにされている。一方で、火災情報の根源となる出火情報の収集は住民通報によるところが大きく、災害時にはこうした情報がいかに収集されるかが重要となる。しかしながら、突発的に発生する巨大地震時において、初動期は混乱状態となり災害情報は不完全な情報となることが懸念される。

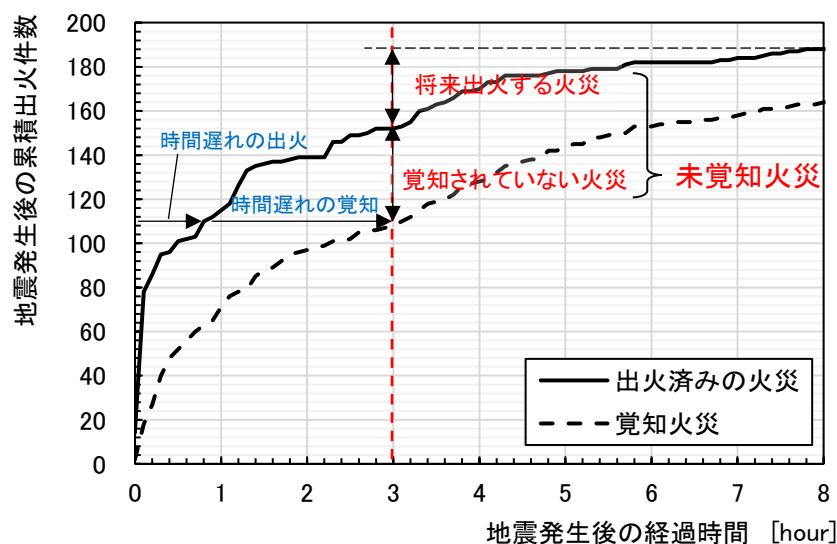
図 1-1 に、[日本火災学会 1996]を基に作成した兵庫県南部地震 6 時間後までにおける累積出火件数と累積覚知件数の推移を示す。図 1-1 に示す通り、地震火災時の出火は地震発生後より時間遅れで増加していき、また、行政や消防機関によって覚知されるまでに時間が要し、一部の火災は初動対応機において覚知されない。そのため、ある時点で避難誘導の意思決定を行う場合、一部の火災が未覚知の状態での避難誘導を行う必要がある(以下「未

1.1 研究の背景と目的

覚知火災の存在」). また, 地震火災の延焼メカニズムには未解明な点も多く, 現在の延焼速度式による予測には一定の誤差が含まれ, 飛び火や突風等の急な気象変化, 建物以外の可燃物の存在等によって, 予測よりも速く延焼拡大する可能性が考えられる(以下「延焼予測のばらつき」). 以上の未覚知火災の存在と延焼予測のばらつきという以上2つの不確実性に着目すると(以下「火災情報の不完全性」), 不完全な情報下における避難誘導では, 避難者が通過する前にすでに閉塞した経路へ誘導するリスク(以下「火災遭遇リスク」), 既に全経路が途絶し最遅避難時刻を迎えているにも関わらず避難開始をせずに避難不能となるリスク(以下「見逃しリスク」)が考えられる. リアルタイム避難誘導を効果的に実施するためには, 「火災遭遇リスク」及び「見逃しリスク」に対して十分に頑健な方策を検討する必要があると考えられる.

これまでに述べた問題意識を整理する. 地震火災時において, 自由意思による避難では市街地上における逃げ惑いが生じることが考えられ, 火災による甚大な人的被害が生じることが懸念される. そこで, 覚知火災情報に基づいた行政機関しゅどうによる住民の避難誘導が必要となるが, 覚知火災情報は不完全な情報であり, 避難誘導にリスクが伴う. 特に, 本研究で着目した「未覚知火災の存在」と「延焼予測のばらつき」の2つの不確実性の下での避難誘導では, 住民が予期せぬ火災に遭遇する可能性及び避難開始時刻の見逃し可能性が存在し, 誘導した住民が逃げ惑いに陥る危険性が考えられる.

そこで本研究では, この不完全情報下において覚知火災情報を効果的に活用し, 確実に避難誘導を行うための方策について基礎的なモデルを構築する. そして, 構築した避難誘導モデルに基づき, 不完全情報下において本研究のリアルタイム避難誘導の優位性を示すとともに, 不完全情報下の不確実性が有するリアルタイム避難誘導の限界を明らかにし, 地震火災時のリアルタイム避難誘導體制のための知見を得ることを目的とする.



[日本火災学会 1996]を基に筆者が作成

図 1-1 兵庫県南部地震における 8 時間後までの累積出火件数と累積覚知件数の推移

1.2 関連研究と本研究の位置づけ

本節では、本研究で想定するリアルタイム避難誘導の流れを示した後、関連する研究を概観し、本研究の位置づけを述べる。本研究では、現実を取り巻く地震火災時の状況より、多くの事象捨象し、地震火災時の不完全情報による不確実性の数理モデル化を行い避難誘導対策の在り方を検討する。そこで、考えられる地震火災時のリアルタイム情報と考慮すべき事象より、リアルタイム避難誘導の流れを整理する。その後、リアルタイム避難誘導を検討する際の関連研究について概観した後、本研究の位置づけ・適用範囲を示す。

図 1-2 に本研究で想定するリアルタイム避難誘導の流れを示す。実際にリアルタイム避難誘導は現在検討されていない避難対策であるため本研究独自の構想であることに留意する。なお、震度情報・地盤情報(市街地情報)は省略している。リアルタイム避難誘導では、発災時の建物倒壊による道路閉塞を含む経時的に途絶される道路ネットワークの被害状況を所与とし、避難情報である避難開始時刻・避難経路・避難場所が計算される。これらは、潜在的なリスク評価や安全評価に基づいて予め定められた情報に基づき、臨機応変に逐次変更される。道路閉塞は避難の時間的制約となり・避難場所の収容人数が避難の容量的制約となるため、3つの避難情報の算出において互いに入出力の関係にある。避難情報が算出された後、携帯端末や防災行政無線・誘導員等を通じて避難者への情報伝達が行われる。情報伝達後の避難者の行動を把握し、避難者の位置情報が次の避難情報算出時の入力となる。以上の中で最重要なものは入力となるリアルタイム情報である。リアルタイム情報には、気象情報、火災情報、建物倒壊・道路閉塞情報、観測若しくは推定された避難状況が挙げられ、こうした情報に基づき延焼拡大予測や道路閉塞の判定、避難群集の密度や開設された避難場所の避難人口等の計算に用いられる。

以上の過程を実現する上で必要な研究的知見が、避難情報を算出するための避難理論モデル(1.2.1)、火災による被害予測を行うための延焼拡大予測(1.2.2)、潜在的なリスク評価(1.2.3)、潜在的なリスクに基づく避難計画手法(1.2.4)、避難行動解析(1.2.5)である。

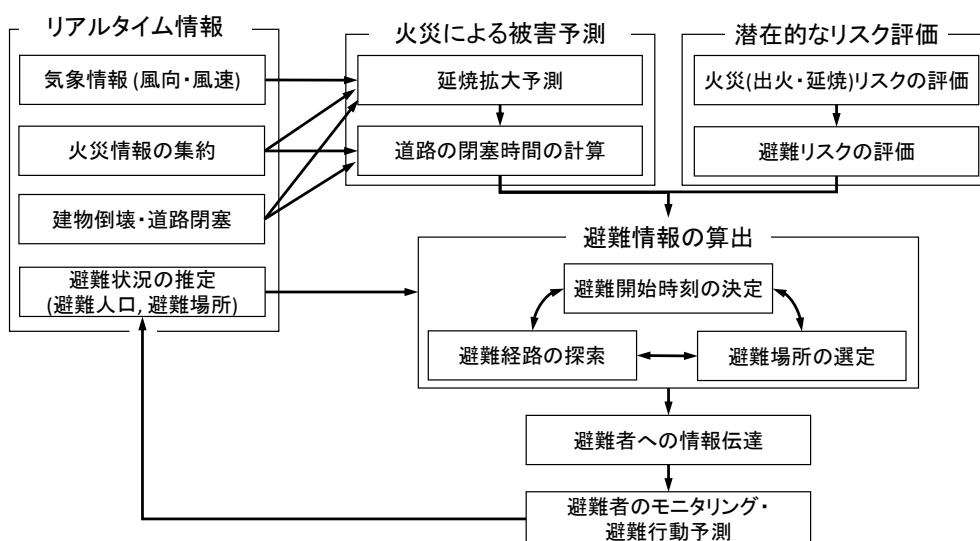


図 1-2 地震火災時におけるリアルタイム避難誘導の流れ

1.2.1 最遅避難理論

はじめに、本研究の問題意識の根幹であり、地震火災時の重要な避難理論として最遅避難理論が挙げられる。最遅避難理論とは、増山・李・梶の一連の研究([増山, 梶 1984][増山, 梶 1985][李, 梶 1992])によって導かれた避難理論であり、地震火災の同時多発的な火災延焼拡大に対して、住民の命を守る最終手段として広域避難を定義し、出火・延焼状況を所与とした最遅避難時刻と呼ばれる安全限界の導出モデルを開発している。最遅避難時刻とは、避難経路上の道路閉塞時間に対して避難者が通過できる最大時刻を逆算することによって求められる、居住地・就業地に最も遅くまで留まることができる限界時刻である。

[増山, 梶 1984]は、固定的な避難経路を想定し、避難群集を流体モデルと見立て、混雑による速度低下を考慮した避難群集の通過時刻と道路の遮断時刻より、発災から避難開始までの猶予時間の限界値の算出方法を提案している。[増山, 梶 1985]では、本モデルを応用し、避難の最早発令時刻(最遅避難理論に基づく避難誘導に従う最早の避難開始時刻)を所与とし、避難圏域の全避難者が避難完了するために各地点が遮断されてはならない時刻の最大値(遮断余裕時間)を導出し、地点別に遮断余裕時間を可視化することで、最遅避難理論の観点より広域避難計画の評価手法を提案している。各地点が遮断余裕時間以内に遮断されることを防ぐために出火点が存在してはならない空間的範囲について、(1)災害時に優先的に火災防御する範囲(風向考慮)、(2)不燃化を促進すべき範囲(全風向対応の最大範囲)を求めている。[李, 梶 1992]は、火災状況に応じて火災を迂回するように避難経路及び避難圏域の変更する手法で最遅避難モデルの拡張を行い、より柔軟なりアルタイムな避難誘導を可能にしている。以上の一連の研究では、火災による経路変更の有無の違いはあるが、距離又は人口で重みづけした避難の余裕時間を指標とした最短経路について、避難群集の最遅避難評価を行っている。[金井, 梶 2002]は、ダイクストラ法を応用し、最遅避難時刻の最大化する避難経路選択手法をし、より正確な限界時刻として避難開始時刻を決定するモデルを提案している。本研究の最遅避難時刻は[金井, 梶 2002]の手法に従っている。

増山・李・梶の一連研究は、最短経路又は火災を迂回するシンプルな経路による避難誘導に従う避難群集を規定することで、地域の最遅避難時刻を把握し避難指示・勧告の発令や避難誘導・火災防御に役立てるという意図が見受けられる。一方、金井・梶は、その最大値を求めるという特性上、災害時要支援者や初期消火活動等の避難が遅れざる負えない特定の避難者について安全限界を求め、可能な限り安全を確保するという意図が見られる。以上の研究は、最遅避難時刻は火災情報と延焼予測に関して十分正確に把握できる前提でモデル化されている。一方、災害時の混乱期には多くの情報が錯綜するほか、広域な避難圏域の各所で発生した火災は、部分的には住民通報や消防職員の巡回によって覚知されるものの、それには一定の時間を要するため、この前提による避難誘導には危険性が伴う。以上の問題に対して、上記の研究では、最遅避難理論の適用時の留意事項を提言している。

【火災情報が出揃い発令できる時刻(最早発令時刻)を想定した対策】

- (1)最早発令時刻を待たずに避難開始させる地域の特定
- (2)発令時に避難不能な地域を出さないために優先的に火災防御を行う地域の特定

【運用情報に対する余裕】

- (3)算出される最遅避難時刻に対して十分な余裕時間を考慮した避難開始

1.2.2 地震火災時の延焼拡大予測

避難誘導における地震火災のリスクの評価において重要な点は、その対象地域に延焼が及んでいるのか・いつ延焼が及ぶのかを評価し、その延焼によって道路途絶が経時的に発生することを特定することである。ゆえに、各建物の出火の可能性と各地域・道路への延焼可能性を評価することが重要であり、何件の出火がどこに発生し、それぞれの建物がどこまで延焼拡大するのかを予測する手法が求められる。

既往研究における延焼予測手法は、以下の3つに大別できる。

- ① 過去の大火や火災実験に基づき市街地の延焼速度を直接分析した手法 ([浜田 1951])
- ② ①で得た延焼速度から延焼過程のメカニズムを分析した手法 ([東京消防庁 2001])
- ② 建物間の延焼を確率過程として扱い、その確率分布を求める手法
([青木 1987], [糸井川, 腰塚 1988])
- ③ 物理的なメカニズムを導出した手法 ([岩見ら 2006], [樋本 2008])

いずれも、以上のような予測モデルを用いることで、ある時刻における火災状況に対して数十分から数時間後というスケールで延焼動態を予測し、延焼が到達する範囲及び道路の閉塞状況を計算することで、時々刻々と閉塞する道路状況に対して避難対策を動的に検討することが不可欠である。地震火災時の消防運用において、延焼予測に基づきより大きな延焼拡大が想定される火災を優先的に消火することで、延焼拡大を効果的に防ぐことができることがシミュレーション実験によって検証されている([佐々木, 関澤 2014] [廣川, 大佛 2017])。避難の面においても、前述の最遅避難理論において、火災の延焼拡大に基づく道路の閉塞時間に基づき、避難経路および経路の限界時刻を算出する手法が提案されており、延焼拡大予測は地震火災時のリアルタイム対応における要であると言える。

覚知した火災に対して順次対応する消火活動とは異なり、リアルタイム避難誘導の場合には火災の延焼拡大に対応した避難の危険性を評価する必要がある。言い換えると、時々刻々と途絶されていく道路ネットワークに対して、全ての避難経路が途絶される前に避難させることが重要であり、そのためには、途絶された時点での判断や、覚知されている火災のみでの評価では対応が遅く、覚知されていない火災の存在も考慮に入れなければならない。そこで、地震火災の潜在的なリスクを評価し、延焼拡大予測による道路閉塞情報に対して潜在的なリスク情報を付加する必要があると考えられる。

1.2.3 潜在的な火災リスクと避難リスクの評価

地震発生前の事前対策や地震発生初期における出火点を含む火災情報が収集されない段階では、出火点を特定しない地震火災の潜在的なリスク評価に基づき、対策を講じる必要がある。地震火災のリスクは、出火の可能性と延焼拡大の可能性を掛け合わせた焼失可能性として評価されることが多い。

出火の可能性に関しては、ある特定範囲の地域における出火件数を予測する手法が用いられる。出火件数の基礎的な算定手法には代表的なもので、以下の3手法が挙げられる。

- ① 過去の地震時の出火記録より市区町村レベルの広範囲における出火件数を統計的に予測する手法([水野, 堀内 1976]),
- ② 出火要因別の使用実態より数百メートルメッシュの比較的狭い範囲において潜在的な出火危険を相対的に評価する手法([東京消防庁 1987]),
- ③ ①で求めた出火件数を②の潜在的なリスクによって案分し、市区町村内の地区レベルの狭い範囲における出火件数を予測する手法([糸井川 1990])

東京消防庁では、こうした基礎的な方法の改良が繰り返し行われ、5年に一度、東京消防庁による地域別出火危険度測定が講じられており、①や②に加え、過去の地震火災及び平常時火災の出火メカニズムを解析することで、より詳細な出火件数の評価が実施されている([東京消防庁 2017])。

いずれも、出火を確率的な事象として扱い、地区レベルの大小はあるものの地区内において何件程度という面的なリスク評価がなされる。したがって、ある特定の建物からの出火の可能性を決定するものではなく、更には、出火件数のばらつきがあるため、リアルタイムにおける安全な地域や危険な地域の特定は困難である。一方で、後述する延焼リスクに加えて火災リスクの総合評価を行い、火災リスクが高い地域を重点的に対策することで、より高い被害軽減効果が期待できる。

延焼の可能性は、ある建物や地域に出火が生じたものとして延焼が生じる範囲との評価が行われる。代表的な評価手法に関する研究として、

- ① 市街地の幾何学的特性から延焼領域を求める手法 (不燃領域率([建設省 1982]), パーコレーションモデル([加藤 1998]), 延焼クラスタ([加藤ら 2006]))
- ② 延焼シミュレーションに基づき一定時間に焼失する領域を実験的に求める手法 (東京消防庁の延焼危険度調査([東京消防庁 2020]), [糸井川ら 1991], [廣川, 大佛 2017])

以上の延焼の危険性評価は、特定の地域において延焼しうる最大範囲を求めている。

出火の可能性と延焼の可能性を組み合わせることで、焼失棟数または面積として火災リスクの潜在的なリスク評価が行われる。火災リスクを出火・延焼の両面から評価することで、防火対策の指標として広く応用されている。[阿部 2005]は、難燃化整備の優先順位を求めることを目的として、平均焼失棟数を指標とし、延焼限界距離を用いた延焼経路ネットワークを効率的に分割する方法を提案している。[加藤ら 2006]は、延焼クラスタ内の建物が1棟以上出火した場合に、延焼クラスタ内の建物が全棟焼失すると仮定し、地域別の焼失棟数の期待値によって地域の火災リスクを表現する試みを行っている。[東京都 2018]

1.2 関連研究と本研究の位置づけ

では概ね 5 年ごとに実施している地震に関する地域危険度測定調査の一環として、火災危険度の調査を行っており、先に説明した出火危険と延焼危険より区別・町丁目別に単位面積当たりの焼失棟数の期待値を実験的に求め、5 段階のランク分けを行っている。[栗田 2007]は、延焼面積の経時的な変化に関する解析的な特徴を明らかにするために、ポアソン分布に従う出火点と一定速度で延焼拡大する延焼モデルによって地震火災を抽象化し、焼失面積に関する解析的なモデルを構築し、経時的に出火点が増えていくことによる延焼面積が加速する様相を明らかにしている。

一方、避難の問題に焼失棟数や面積といった火災リスク指標を直接応用するには、少々工夫が必要となる。避難の問題は、避難者及び避難場所と火災リスクの相互関係である。火災リスクの場合、同じモデルで表現された建物間もしくは地域間の受害関係を評価しているのに対して、避難の問題の場合には、火災リスクとは異なるモデルで表現された避難者の行動特性を考慮した受害特性を求める必要がある。避難者の行動特性は非常に複雑であるため、住民調査等によって把握した行動特性や何らかの規定した避難行動モデルに基づき地震火災下で避難を実施するシミュレーション実験が多数行われている(1.2.5 で詳述)。行動記述モデルに大きく依存するため、それぞれの研究において検証する避難対策や避難行動の特性に合わせたモデルの取舍選択が重要である。他方、シミュレーション実験に依らない避難リスクの評価手法としては[小出 1982]の研究が挙げられる。小出は、固定的な避難経路と避難開始時刻に対して、避難経路上の通過時刻を考慮し、避難者が避難経路上で火災に遭遇してしまう時に出火点が存在する空間的範囲を幾何学的に算出し、避難者が火災に遭遇せずに避難場所まで到達できる可能性について確率論的な立場で導出している。小出の避難リスク評価は、避難計画における避難経路の信頼性(火災によって途絶されないか)の評価という側面が強く、地震火災時に懸念されている逃げ惑いや最終的な避難場所への到達可能性を評価することは困難であるが、こうした評価の高い経路を複数確保しておく事前対策を講じることが地震火災時における避難安全の確保が期待できる。

[石井、腰塚 1998]は、小出のモデルを応用し、避難者が火災に遭遇するまでの構造をモデル化することで、距離分布について解析的に導出している。矩形領域の市街地を想定しその内部(市街地)から外部(避難場所)への直線避難において、矩形領域内の避難距離分布および一定距離以内で延焼領域に侵入する確率(被災率)を導出している。最短経路での移動という避難路情報の付与(非施設的対策)や領域内部への避難地の設置による被災率の低減効果を評価しており、前者では 1/8、後者では 1/24 となることを検証している。本モデルの本質は、如何にして市街地全体の避難距離を短くするのかがであり、この距離基準を避難リスクの立場(避難と火災リスクの関係)から評価している。

以上の火災リスク及び避難リスクの評価手法を、避難計画において定めるべき避難経路・避難開始時刻そして避難場所の選定時に考慮することで、安全な避難計画が策定される。

1.2.4 潜在的なリスクを考慮した事前的な避難計画

大地震時における火災被害は、地震発生後に不確実に定まる出火点の分布に影響すること路が大きく、1.2.3で紹介した手法等、出火点を特定しない手法に基づき「どこに・いつ・どの経路で」避難するのか、安全設計を行う必要がある。

「どこに」… 避難場所自体の輻射熱に対する安全性の検証 ([浜田 1967]), 避難場所の収容人数による検証 ([太田, 鏡味 1981])

「いつ」… 最遅避難時刻の確率的評価 ([洪水, 糸井川 2016])

「どの経路で」… 火災遭遇リスクの最小化 ([三好ら 2008])

基本方針として、あらゆる出火・延焼状況に対しても平均して安全を確保した静的な計画である。そのため、如何なる出火・延焼状況に対して確実に避難誘導できるかについて限界がある。そこで、こうした避難情報をリアルタイムで、状況に応じた動的な変更が重要である。前述の[李・梶 1992]の研究では、最遅避難時刻による猶予時間を一指標として、避難経路変更及び避難圏域の再分割を行う手法を提案している。

1.2.5 避難シミュレーションによる避難行動解析

地震火災時の避難行動は、避難者の行動について過去の災害事例の調査や実験、流体力学的な特性より記述し、地震火災を模した市街地を想定した避難シミュレーションを実施することで解析される。

避難シミュレーションにおける避難行動の記述手法は、以下の3つに大別される。

- ① 避難群集を流体と見立てて避難場所への流入を再現 ([藤田 1965], [小坂, 堀口 1986])
- ② 避難場所との位置関係や火災のリスクに応じたポテンシャルに従って移動 ([西野 2009], [木村ら 2010])
- ③ 過去の調査等により詳細な行動分岐を想定したマルチエージェントモデル ([馬淵ら 2008], [大佛, 沖 2012], [加藤ら 2016])

地震火災時は出火点の分布が不確実であるため、一つの出火パターンに対して検証を行っても不十分である。そのため、ランダムな出火点に対するシミュレーションを複数回試行し、確率分布を得るモンテカルロシミュレーションを用いて避難行動の評価が行われる。代表例として、いくつかの研究を挙げる。

[木村ら 2009]は、地震火災の安全基準を避難リスクの観点から評価することを試みるため、避難圏域をメッシュ状に分割し、そのメッシュの通過可否を[石井・腰塚 1998]の確率モデルに従い判定を行い、避難者を避難場所まで、メッシュ間の移動をさせるシミュレーションを行い、避難場所まで到達できる可能性を評価するモデルを開発している。このようなシミュレーションを、火災リスク別に複数回繰り返し、そのうち何回被災したのかを評価することで、地震火災の安全基準を検討している。[武松ら 2008]は、地震火災を考慮した広域避難の評価を目的とし、ランダムに発生させた出火パターンに対して、避難先の選択方法(指定避難場所, 最近隣場所へ自由避難)や火災の迂回有無等、様々な避難行動を想定し、到達不能率(いわゆる被害率), 平均避難距離, 避難場所の避難者密度の三軸で避難リスク評価を行っている。以上の研究ではいずれも、被災判定について個人を対象に行って

1.2 関連研究と本研究の位置づけ

おり、被災人口もしくは比率によって対象領域全体に対する評価を行うことで地震火災の避難リスクの評価が行われる。

また、避難シミュレーションを応用し、地震火災時の消火対応や要支援者の避難支援等の効果を評価した研究も散見される。[上田ら 2007]は災害時要援護者(当時の呼称)の搬送の可能性について、地震火災による道路閉塞を考慮し、ランダムウォークする救助者エージェントによる搬送による効果の検証を行っている。この時、エージェント間の情報交換や行動に戦略を与えることで、より効果的な支援対策を検討している。[沖, 大佛 2016]は、現実の人口分布や市街地状況を詳細に再現した地震災害時の道路閉塞・地震火災及び避難行動等を記述したモデルによる広域避難シミュレーションに対して、ランダムに選択した防災組織市民メンバーによる救助活動を組み込み、救助活動の評価を行っている。[宮下ら 2020]は、地震火災時における消火活動の効果について、住民避難時の人的被害軽減を目的として、避難シミュレーションによる評価を行っている。

以上のように、避難行動記述による避難シミュレーションを用いることで、地震火災時の応急対策の効果検証が可能である。

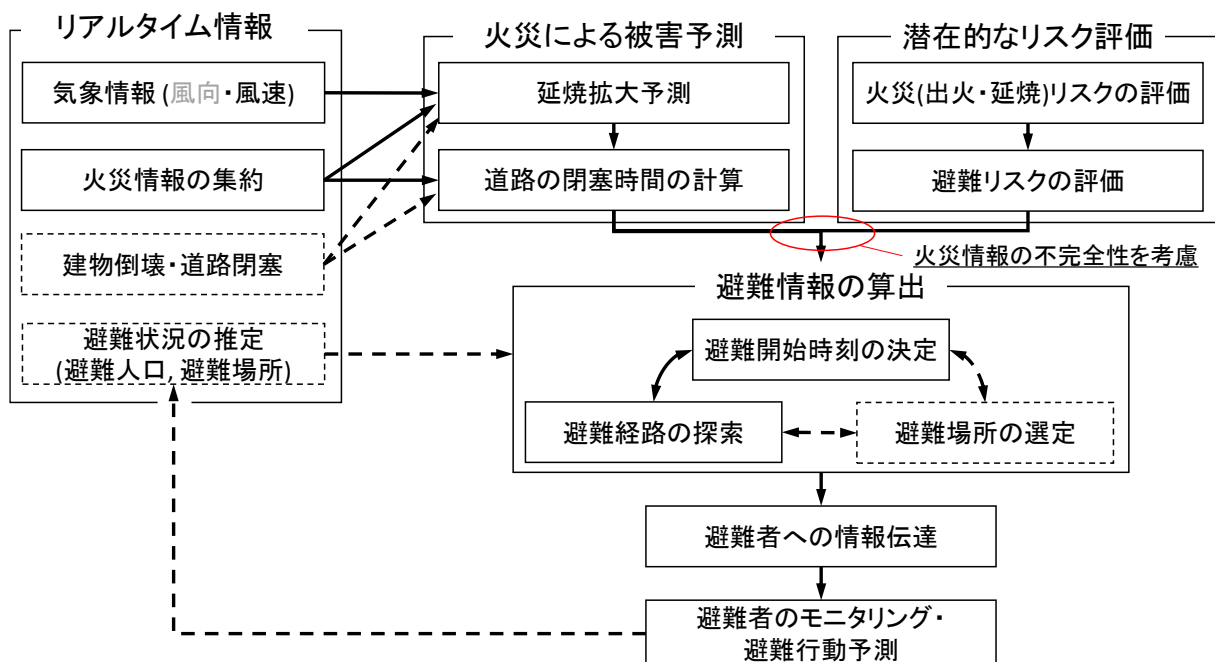
1.2.6 本研究の位置づけ

リアルタイム避難誘導を実現するための研究的知見を概観した。以上を踏まえ、本研究の位置づけを示す。

a) 不完全情報の避難リスクを数理的に記述する理論モデルの構築

本来、リアルタイム避難誘導の実現までには、1.2.1 から 1.2.5 に示した技術の一つずつ組み合わせせていき、システム構築を図る必要がある。一方、先行研究には、不完全情報による避難誘導の誤りによるリスクを扱った研究はなく、まずは、不完全情報の避難リスクをどのように扱い、避難誘導に適用させるのかを検討する必要がある。そこで本研究では、不完全情報による避難リスクと効果的な避難誘導に関する理論的なモデルの構築という位置づけとする。[小出 1982]や[石井, 腰塚 1998], [栗田 2007]を解析的なモデルを応用し、地震火災の出火・延焼を単純なモデルとして扱い、建物倒壊による道路閉塞や避難群集による混雑といった避難ネットワークを取り巻く固有な特性を全て捨象する。図 1-3 に以上の項目を捨象したリアルタイム避難誘導の流れを示す。地震火災と潜在的リスク評価において同一の単純な出火・延焼の仮定に基づいて避難リスクを構築することで、潜在的なリスクと覚知情報の関係より、火災情報の不完全性の理論的な記述を試みる。建物倒壊による道路閉塞や混雑等、火災による道路閉塞以外の避難阻害の要因を極力排斥し、地震火災・地震火災における部分集合である覚知情報・覚知情報に基づく判断および避難行動の関係を数学的に明確に記述することを目標とする。

また、不完全情報下の避難リスクについて、避難圏域全体に対する評価ではなく、とある避難開始地点を出発する個人に着目した個人避難モデルの構築を試みる。単一の避難属性に焦点を当てることで、避難リスクと火災情報の関係を明確化することを意図している。



本研究において捨象する要素：破線枠・破線矢印・灰色文字

図 1-3 リアルタイム避難誘導における本研究の適用範囲

b) 先行研究のリアルタイム情報システムとの比較

リアルタイム避難誘導を目的としたシステムは、避難誘導計画を防災システムとみなしてモデル化した小林・堀内の研究([堀内, 小林 1973]), 最遅避難理論を基礎として避難開始時期・経路・圏域割り当てを同時に最適化した建築研究所の情報処理システム([建築研究所 1989])が挙げられる。表 1-1 に、これらの研究と本研究の比較を示す。先行研究は、基本的に完全情報を想定しており、避難群集の誘導を想定している。避難開始時期は、ある一時点に避難群集全体が避難開始することを想定している。現実に応用することを想定しているため、避難者人口を考慮し、避難者数に合わせて避難場所を適宜変更している。一方、本研究は、火災情報を不完全情報とし、不完全情報による避難リスクを考慮した避難情報の構築を試みる。また、不完全情報の避難リスクは地域で均質ではないことから、一人避難者に着目して避難情報を構築し、最遅避難理論に基づく避難開始時刻の決定を不完全情報の避難リスクを判断しながら決定するモデルを構築する。本研究は、避難者の割り当てを問題としていないため、避難場所は固定とし、ある避難開始地点から固定の避難場所へ不完全情報下で避難可能であるための避難情報の理論構築を試みる。

表 1-1 先行研究のリアルタイム情報システムとの比較

	火災情報	避難者基準	避難開始時期	避難場所
[堀内, 小林 1973]	完全情報	避難群集	地震発生時刻 (1 時点)	避難者数に 合わせて変更
[建築研究所 1989]	完全情報	避難群集	最遅避難時刻 (1 時点)	避難者数に 合わせて変更
本研究	不完全情報	一人避難者 (避難開始点)	最遅避難時刻 (リスク考慮, 複数時点)	固定

火災情報：避難誘導の安全を確保するために前提とする火災情報の質

避難者基準：避難誘導の最適化を行う範囲

避難開始時期：火災に対していつ避難させるか

避難場所：避難者の到達地点をどのように決定するか

1.3 研究の構成

本研究では、不完全情報下において頑健な避難経路及び避難開始時刻を得ることを目的として、避難経路と避難開始時刻に着目して避難誘導モデルを構築し、提案モデルによる避難誘導の頑健化の検証を行う。本研究では、避難経路と避難開始時刻の決定方法それぞれについて、(1)理論構築 (2)検証のための避難誘導シミュレーション開発と単純な格子状市街地での検証評価 (3)実市街地におけるケーススタディの3本構成で章立てする。

第2章では、動的誘導経路と呼ぶ不完全情報下における火災への遭遇リスクに対して頑健な誘導経路モデルの構築を行う。「未覚知火災の存在」と「延焼予測のばらつき」が有する潜在的なリスクに対して安全性を定式化し、この安全性を最大化することで火災に遭遇しにくい3種類の避難経路(以下「避難経路規範」)を導出する。その後、最新の覚知火災情報に基づき避難経路を逐次的に更新し続ける情報更新モデルを構築する。常に最新の情報に従うことで、不完全性の影響を低減しつつ、覚知火災情報で把握しきれない火災については潜在的にリスクの低い経路を選択することで、避難誘導の頑健化を図る。

第3章では、第2章で構築した動的誘導経路による火災遭遇リスクの低減効果を検証することを目的として、火災に遭遇することを被災と判定するリアルタイム避難誘導シミュレーションを構築する。その後、火災リスクが一般的な格子状市街地を対象として、リアルタイム避難誘導シミュレーションについてモンテカルロ法を実施し、火災遭遇リスクの特徴と動的更新による火災遭遇リスクの低減効果について基礎的な知見を得る。

第4章では、動的誘導経路について火災リスクの高い大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域を対象としたケーススタディを行い、第2章で構築した誘導経路規範の視覚的特徴と誘導経路規範による火災遭遇リスクの低減効果の比較を行う。

第5章では、最遅避難時刻の不確実性を考慮し、不完全情報下における安全な避難時期の見逃し可能性に対して頑健な避難開始時期決定モデルを構築する。本研究では、事前評価に基づいて予め避難開始時刻を定める事前計画避難と覚知火災情報に基づいて逐次的に避難開始時刻を定める勧告避難によって許容リスクを満たした避難開始時刻を設定する方法を構築する。その後、避難準備や災害活動のための避難開始までの時間確保を目的として、事前計画避難と勧告避難の組み合わせによる避難開始時期の遅延化を図る。

第6章では、第3章で構築したモデルを拡張し、火災遭遇後も避難誘導には頼らずに自力で避難を継続する自由避難モデルを適用することで、避難場所への到達可能性を評価するリアルタイム避難誘導シミュレーションモデルを構築する。その後、格子状市街地を対象として、避難開始時期決定モデルによる見逃しリスクの低減効果を検証する。

第7章では、避難開始時期決定モデルについて大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域を対象としたケーススタディを行い、誘導経路規範の違いによる見逃しリスクの低減効果の比較を行う。

最後に、第8章において、本研究の結論及びリアルタイム避難誘導の実現に向けた提言および課題を述べ、本論を終える。

第2章

火災情報の不完全性を考慮した動的誘導経路
による火災遭遇リスクに対する頑健化

第2章 火災情報の不完全性を考慮した動的誘導経路による 火災遭遇リスクに対する頑健化

2.1 本章の目的と構成

本章では、火災に遭遇するリスクを低減することを目的として、火災情報の不完全性によって火災に遭遇する可能性をリアルタイムで定量的に評価し、頑健な避難経路を決定する方法(以下「動的誘導経路」)を構築する。避難場所の安全が担保されているならば、住民を火災に遭遇させずに避難場所へ誘導することが可能であれば、避難者の火災による逃げ惑いは起こり得ない。そのため、第一に火災に遭遇しないように誘導する方策を考えることが重要である。本研究で提案する動的誘導経路は、火災情報に基づき逐次的に経路上の避難リスクの評価・最適化を行い、避難終了まで動的に更新し続けるモデルであり、常に新しい情報に基づく最も安全な経路での避難を継続させることで、不完全情報の不確実性の影響を抑え火災遭遇リスクの低減が期待できる。

本章の構成は以下の通りである。

2.2 節では、地震火災・覚知情報及び避難行動に関する仮定を設定し、不完全情報下において火災に遭遇しにくくする頑健な動的誘導経路モデルの方針を示す。

2.3 節では、避難可能確率と呼ぶ経路上で避難者が未覚知火災へ遭遇しない確率を定式化し、避難可能確率を最大化することで未覚知火災の存在に対して頑健な避難経路な避難経路を選択するモデルを構築する。

2.4 節では、避難余裕性と呼ぶ避難者が経路上の各道路を通過する場合に許容できる延焼予測の誤差の限界値を定式化する。その後、経路上における避難余裕性が最も低い地点の限界値を最大化することで、延焼予測のばらつきに対して頑健な避難経路を選択するモデルを構築する。

2.5 節では、2.3 節及び 2.4 節において構築した経路選択モデルの特徴を整理し、第 3 のモデルとして、避難余裕性を指定した値以上となることを満たしつつ避難可能確率を最大化する避難経路を選択するモデルを構築する。

2.6 節では、新しい覚知火災情報に基づき、避難完了まで逐次的に誘導経路を更新するモデルを構築する。この時、情報の伝達方法を PUSH 型・PULL 型に分けて情報伝達時間を考慮し、誘導経路が立ち止まりなく一続きになるように更新する方法を提案する。

2.2 不完全情報下における火災遭遇リスクに対して頑健な避難誘導方策

本節では、動的誘導経路モデルを構築するにあたり、まず避難の定義を行い、想定する地震火災、避難情報の伝達過程及び避難情報を伝達された住民の避難行動についてシナリオを設定する。その後、本シナリオ下において、動的誘導経路によって火災遭遇のリスクを低減するためのモデル化の方針を示す。

2.2.1 避難の定義と地震火災時の避難誘導に関するシナリオ

本研究では、地震発生後に延焼拡大をもたらす出火点が時間遅れでランダムに発生する中、各火災の一部に関して誘導者が覚知し、避難誘導情報が生成され、避難者に継続的に情報伝達される避難誘導シナリオを想定する。住民は、伝達された避難誘導情報に従い、自身が被災するまで継続的に避難誘導情報に正確に従い避難を実施する、従順な避難行動を仮定する。以下、a)避難の定義と避難完了条件、b)地震火災、c)避難誘導情報の伝達過程、d)避難者の行動、e)避難者の被災条件に関するシナリオを設定し、各モデルの仮定を示す。

a) 避難の定義と避難完了条件

本研究では、”地震火災に対して自らの安全を確保するために、住民自身が、居住地・就業地等の住民の所在地から、大規模な公園や大学等の地震火災から住民の生命を守るために自治体によって指定された避難先(以下「避難場所」)に移動すること”を避難の定義とし、避難の対象となる住民を「避難者」とする。この時、所在地の火災状況に関わらず避難者が避難場所に到達することを避難完了の条件とする。このように本研究では、やや厳しい定義・条件を採用する。現実の都市には、建物の不燃化により、出火点の空間分布や風速、倒壊状況等の災害状況に応じて、避難場所以外にも火災が到達しない領域が存在する。そのため、避難場所に到達しなくても避難者にとって安全な場合が存在する。逆に、移動しないことで火災に巻き込まれないように、避難場所まで移動する行動がかえって避難者を危険にさらすリスクを増大させる状況も存在すると考えられる。しかし、これらは災害状況に大きく依存する避難先であり、避難者の安全を確認・担保することが重要な避難誘導において安全の確実性に欠ける。[久松, 伯野 1982]の考察によると、関東大震災の被害で多いパターンとして、中学校や本所被服廠跡等、多少広い場所において時間的な余裕がありながらも荷物に固執し焼死した例を挙げており、現在の避難場所のように、火災の輻射熱に対して十分な大規模空地まで避難誘導することの重要性を示唆している。そのため、本研究では、計画上の設計された安全が正確なものとみなして、この安全が担保されている避難場所に到達することが避難誘導の確実性において重要であると考えた。

ただし、避難場所への到達のみが避難の唯一解ではないことに注意したい。[久松, 伯野 1982]は安全な場所を転々としながら逃げ延びた人々の存在も挙げており、火災が収束するまで、暫定的に安全な領域を段階的に待機と移動を繰り返すこともまた、避難の一つである。連続して長距離の移動を伴う本研究の避難よりも、乳幼児や高齢者、要介護者等の避難支援を必要とする人々にとっては、段階的な避難の方が有用である可能性も考えられる。しかしながら、不完全情報下で逐次的に安全な場所を特定することは本研究の対象外であり、このような段階的な避難は今後の課題とした。

b) 地震火災

地震火災は出火件数及び出火点の空間分布、各出火点の出火時刻を定める出火モデルと各出火点より市街地上の延焼動態を表す延焼モデルによって規定され、道路閉塞及び各地点への火災接近が表現される。本研究では、避難誘導のリスク評価・効果検証を行うための基礎的なモデルという位置づけとして、十分広い空間に無作為に出火し、等速かつ同心円状で延焼拡大する単純な地震火災を仮定する。

出火モデルの先行研究([熊谷ら 1982])では、建物の用途別に地震動および発災時刻に対して出火確率が推定されるため、完全にランダムな空間分布とは言えない。しかしながら、地震火災時の広域避難が対象とする地域が住居地域であること、数キロ四方の避難圏域程度の領域であることから、建物の用途及び地震動に避難圏域内におけるばらつきは小さいと考えられる。そこで、地震火災は出火件数密度 ρ に従い市街地上にランダムに出火点が設定され、出火件数の累積分布 $F(t)$ に従って、地震後に時間遅れで出火するものとする。この過程により、地震発生後の時刻 T における出火点の空間分布は、市街地面積を S として、期待出火件数 $\lambda = \rho F(T)S$ の空間ポアソン分布に従うとすることができる。ただし、第4章・第7章の実市街地を対象とする場合、建物分布に偏りが存在する。そこで、建物を耐火造・非耐火造の2種類に分類し、そのうち非耐火造の建物重心にのみ出火するものとする。

延焼モデルは、等速同心円状という強い仮定を置く。延焼拡大予測の先行研究(例えば、[樋本 2005], [岩見ら 2006])では、隣棟建物への類焼及び飛び火による風下側への着火等を考慮し延焼拡大が表現される。そのため、炎上建物の増加に伴う延焼速度の加速効果、風下側への煽り及び建物構造の違いにより延焼拡大方向には偏りが見られる。一方、本研究における等速同心円状の仮定は、こうした複雑な延焼動態の特徴を全て捨象し、常に最大速度で延焼拡大し全方向が風下側とみなした状況を表現していると言える。このような仮定の下で避難誘導の効果を検証することで、避難にとっては安全側の評価を行えることを意味する。そこで、延焼速度 v_f とし、出火後、各出火点より道路およびその両端点に対して直線距離で到達するものとした。ただし、第4章・第7章の実市街地を対象とする場合、市街地上の耐火造建物や広幅員道路による延焼遮断の影響を考慮するため、市街地上に通行不能領域と呼ぶ延焼遮断が生じず延焼拡大する領域を定義し、出火点が属する通行不能領域上のみで延焼し、通行不能領域の境界で焼け止まるものとした。

ここで考慮しない事象について触れておく。本研究のモデル化において、飛び火による延焼拡大・出火点の増大、建物倒壊による道路閉塞の2点について考慮しないこととした。

その理由として、

- ①モデルの記述を簡素化するため
- ②飛び火については、延焼拡大・出火点の増大は、避難誘導の効果を評価する基礎モデルの観点では、期待出火件数密度の増減・延焼速度の大小で近似可能と考えた。
- ③本研究では、時々刻々と拡大する延焼によって増大する道路途絶による避難の影響をモデル化することとし、建物倒壊は、余震を考えなければ殆どが地震と同時に生じることから、地震火災と比較して“動かない”の現象であり本研究の対象外とした。

ただし、今後、実用化に向けて、飛び火及び建物倒壊を組み込んだ応用モデルの開発が今後の課題として必要であると考えている。

c) 避難誘導情報の伝達過程

本研究では火災の覚知・火災情報及び避難情報の加工・避難情報の過程について想定する。伝達地震発生後に各建物で発生した火災は、住民や情報収集活動中の消防職員等によって発見され、住民通報や無線機の連絡、消防署への駆けつけによって覚知される。覚知された火災は、出火時刻及び出火地点の2つの情報(以下「出火情報」)として、消防機関等の避難誘導システムに集約されるものとする。集約された出火情報に基づき、延焼拡大の将来予測を行い、道路ネットワークの閉塞時刻が計算される。本研究では、出火情報、延焼拡大の将来予測及び道路ネットワークの閉塞時刻を合わせて、「覚知火災情報」と呼ぶ。また、覚知火災情報以外の火災を「未覚知火災」と呼ぶ。避難誘導システムは、新しい覚知火災情報が得られる度、避難者の位置情報及び避難者属性の基づき、火災状況に対して安全な避難経路を計算し、携帯端末等を通じて避難者に伝達されるものとする。

以上のシナリオより、避難誘導情報モデルの仮定を示す。発生したそれぞれの火災は、覚知確率 r 、出火から覚知までの所要時間の累積分布 $G(t)$ に従って覚知され、出火点の位置と出火時間が覚知火災情報として集約される。覚知火災の出火点より延焼予測を行い、各道路上の閉塞点とその閉塞時間が計算される。本研究では単純化のため、出火点を中心に円形に一定の速度で延焼拡大するモデルを用い、a)の地震火災と一致するものとする。すなわち、a)の地震火災に対して正確な延焼拡大の将来予測を可能とする。この仮定は、延焼予測のばらつきを扱うことと相反してしまっている。本研究では、延焼予測のばらつきに対する避難誘導効果について、火災と避難者が覚知火災に対してどの程度離れているのかという余裕の評価によって検証する。つまり、この余裕が大きい避難ほど、本研究のシナリオに対してより大きな延焼予測のばらつきを付加(延焼速度が定数ではなくなる)しても、避難誘導が成立することを意味している。この余裕を制約として、未覚知火災の存在に対する安全性を維持できるのか検証する。なお、覚知確率 r 、覚知所要時間の累積分布 $G(t)$ は既知とする。

d) 避難者の避難行動

避難者は、自宅や避難場所等において、携帯端末等によって避難情報(避難開始時刻・避難経路)を取得する。本章では、予め固定的な避難開始時刻を決めておき、避難開始時に最新の避難経路情報が取得される。避難開始後、取得した避難経路に従い、一定速度で避難場所まで移動する。避難者は、避難途上において新しい避難経路の更新情報を取得することが可能であり、更新情報を受け取ったのち、直後の交差点より、新しい避難経路に従って避難を進める。以上のように、避難誘導に正確に従う避難行動を想定することで、避難誘導の効果を評価する。

e) 避難者の被災条件

本研究では、避難者が避難開始前及び避難途上で未覚知火災に遭遇した時点で被災とする。現実の避難誘導の場面では、誘導先にて避難者が未覚知火災に遭遇した場合でも、避難者が自力で避難場所まで到達できる可能性は大いに存在する。しかし、避難者にとって、未覚知火災に遭遇した時点で誘導された避難経路への信頼性は少なからず低下し、避難者が避難経路を見失う可能性が考えられる。避難誘導の立場からすると、避難者が避難経路を見失った時点で、その避難は危険なものとなることができよう。本章における避難誘導において、火災に遭遇した時点で避難者の避難誘導への信頼が喪失し、避難者は避難経路を失った状況に陥るものとみなし、この状況を”被災”と定義した。なお、第5・6・7章では、火災遭遇後も自力で避難を継続させ避難場所までの経路が存在しなくなることを被災と再定義する。

避難者の避難誘導情報に対する信頼性の増減と避難誘導への態度に関しては、一部、[清水, 糸井川 2019]にて検証されているが、本研究で火災遭遇後の態度として記述するには十分な結果が得られておらず、住民を対象とした実験や質問紙調査等で改めて検証する必要があり、本研究では今後の課題とする。

2.2.2 火災への遭遇可能性による避難誘導の頑健性の定義

本章では、避難開始後に、火災に遭遇せずに避難場所へ到達できる可能性として、避難誘導の頑健性を定義する。本研究で着目している不完全情報である、未覚知火災の存在と延焼予測のばらつきに対して、それぞれ火災に遭遇しない可能性について考える。未覚知火災に対しては、避難者が通過する前に未覚知火災によって避難経路が閉塞されるか否かについて、頻度確率を評価すればよい。一方、延焼予測のばらつきに対しては、現在、そのばらつきのふるまいが明らかにされていないため、単純に、避難経路の閉塞可能性によって、延焼予測のばらつきに対する頑健性を評価できない。そこで、避難経路の絶えられる延焼予測のばらつきの大きさによって頑健性を定義する。

2.2.3 火災に遭遇しにくい誘導経路の方針と動的更新による避難誘導の頑健化

図 2-1 に、不完全情報下の避難リスク及び本章で提案する頑健な避難経路の提案に関する模式図を示す。覚知火災情報による道路閉塞を避けるように経路を得ると、図 2-1-①に示すような限界時刻に避難が不能になる。素直に最短経路で避難経路を選択するように、火災の発生しやすい領域を避けることやこの限界時刻に対して余裕を与えることを考慮せずに選択した経路は、経路途上に存在する未覚知火災への遭遇や、延焼予測以上の速度で延焼拡大をした覚知火災に遭遇するリスクをはらんでいる。

本モデルでは、こうしたリスクを最小化するために、図 2-1-②に示すように、建物が密集していません未覚知火災の存在する確率が低い経路及び覚知火災から十分に離れている経路について、避難者の通過時刻を考慮しつつ探索することで、火災に遭遇しにくい経路を得ることを目指す。加えて、避難開始後の時間経過に伴い新たに更新された覚知火災情報によって、避難経路を動的に更新することで、常に新しい経路で避難し続けることで、より頑健な避難誘導を試みる。

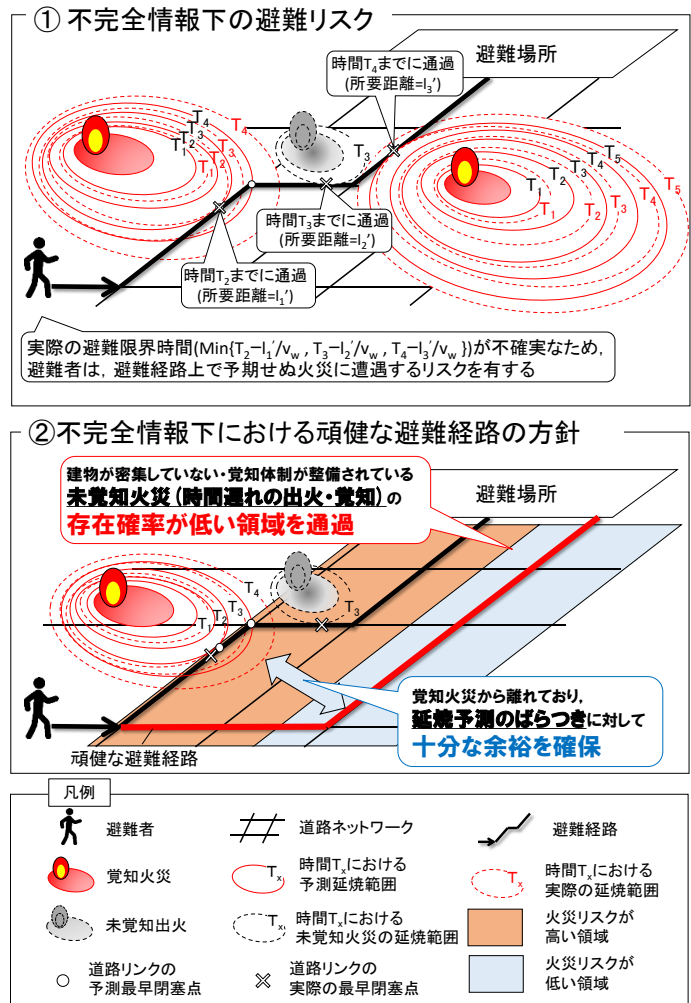


図 2-1 不完全情報下における完全情報下の避難リスクと頑健な避難経路の方針

2.3 未覚知火災への遭遇しにくさを最大化する避難経路選択モデル

(P 最大経路)

本節では、未覚知火災に対して頑健な避難経路の選択モデルを構築する。本モデルでは、覚知火災情報に基づく閉塞道路を避けつつ、未覚知火災への遭遇可能性を最小化する経路を選択する方法を試みる。

2.3.1 問題設定

本研究では[石井, 腰塚 1998]を応用して、未覚知火災に対する安全性として、避難経路上で未覚知火災に遭遇しない可能性に関する確率モデルを構築し、本確率を最大化する経路を得る。[石井, 腰塚 1998]は、全出火が地震発生と同時に生じることを仮定して、ある直線移動 OP において火災に遭遇しない確率(以下「避難可能確率」)を、積分幾何学を用いて導出している。

まず、[石井, 腰塚 1998]のモデルについて、簡単に紹介する。時刻 T_s [h]に地点 O から P に移動する場合、 OP 上の任意の点 P' で火災に遭遇しない条件は、延焼速度 v_f [m/h]、 O から P' までの距離 $l_{op'}$ [m]、歩行速度 v_w [m/h] に対して、図 2-2 中の点 P' を中心とした半径 $v_f * (l_{op'}/v_w + T_s)$ の円内の領域に出火点が存在しないことである。更に、地点 P まで火災に遭遇せずに到達できるためには、 OP 上のすべての点において、同様な条件を満たす必要があり、円の軌跡を考えると、図 2-3 の包絡線が得られる。上記の条件を言い換えると、この包絡線の内側の領域において出火点が存在しないことである。本研究では、この領域を出火警戒領域と呼ぶ。出火点は空間ポアソン分布に従っているため、出火警戒領域内の出火件数 X の確率分布は、(1)で表される。

$$P[X = x] = \frac{(\rho S)^x}{x!} e^{-\rho S} \quad (1)$$

X : 出火警戒領域内の出火件数

ρ : 期待出火件数密度

S : 出火警戒領域の面積

したがって、出火警戒領域内において出火件数が存在しない確率は、 x に 0 を代入することで得られ、(2)で表される。

$$P[X = 0] = e^{-\rho S} \quad (2)$$

2.3 未覚知火災への遭遇しにくさを最大化する避難経路選択モデル(P 最大経路)

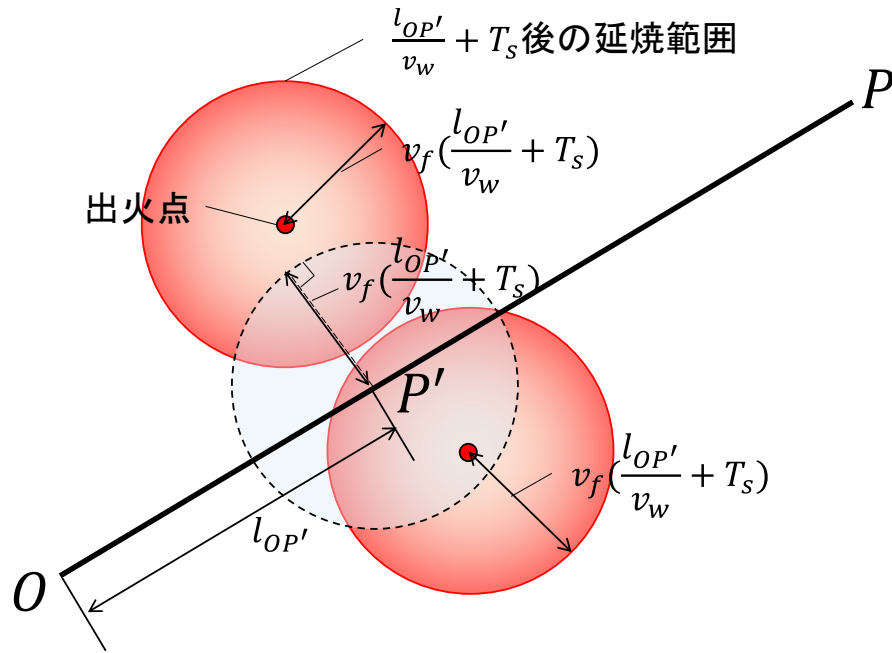


図 2-2 時刻 T_s に避難開始する場合における OP 上の点 P' で火災に遭遇する条件

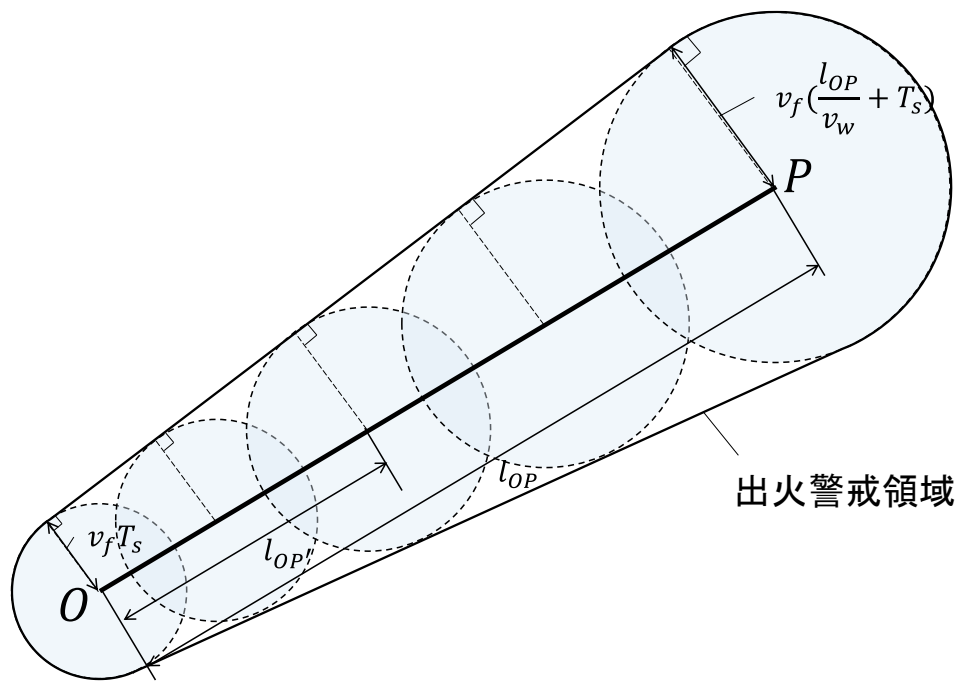


図 2-3 時刻 T_s に避難開始する場合の出火警戒領域

2.3 未覚知火災への遭遇しにくさを最大化する避難経路選択モデル(P 最大経路)

本研究のモデルと[石井, 腰塚 1998]のモデルと異なる点は, 各出火点の出火時刻が確率分布 $F(t)$ に従い, 地震発生後に時間遅れで出火することで, 出火警戒領域が出火時間に応じて変化すること, 得られる避難経路は覚知火災による閉塞地点を避ける経路であるため, 出火警戒領域内に覚知火災が存在しないことが挙げられる.

図 2-4 に, 避難経路の判断と同時に避難開始した場合における, 出火時間に応じた出火警戒領域の推移を示す. 避難経路が未覚知火災で閉塞されずに, 避難者が通過できるためには, 避難経路の判断前後に分けて条件を整理する必要がある. まず, 避難経路が得られた判断時刻に対して, 過去に発生しかつ未覚知である出火が, 出火時刻に対応する出火警戒領域内に存在しないことが条件として挙げられる(図 2-4 -(a),(b)). 同時に, 避難開始後の経過時刻に出火する火災が, 将来, 対応する出火警戒領域内に発生しないことで, 避難者は未覚知火災に遭遇せずに, 避難経路を通過することができる.

以上の可能性を確率によって表現すると, (3)となる.

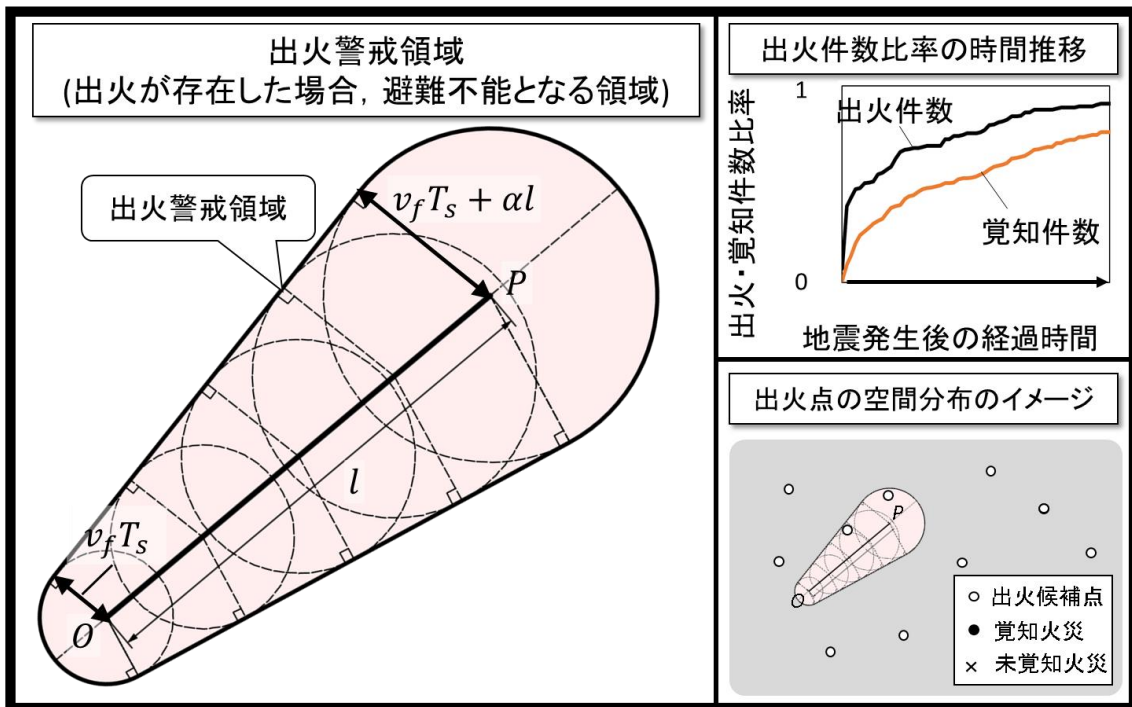
$$\begin{aligned}
 p_{eva} &\equiv P \left[\prod_{k=0}^m X_D(T_s, k\Delta t) = 0 \mid \prod_{k=0}^m X_{r_D}(T_s, T_{jg}, k\Delta t) = 0 \right] * P \left[\prod_{k=n-m}^n X_D(T_s, k\Delta t) = 0 \right] \\
 &= \frac{P[\prod_{k=0}^n X_D(T_s, k\Delta t) = 0]}{P[\prod_{k=0}^m X_{r_D}(T_s, T_{jg}, k\Delta t) = 0]} \\
 &\quad \left(\text{ただし, } T_{fin} = n\Delta t, T_{jg} = m\Delta t, T_{jg} \leq T_s \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

$X_D(T_s, t)$: 避難開始時刻が T_s の場合に, 出火時刻 t に対応する出火警戒領域内で, 時刻 t までに生じた出火の件数

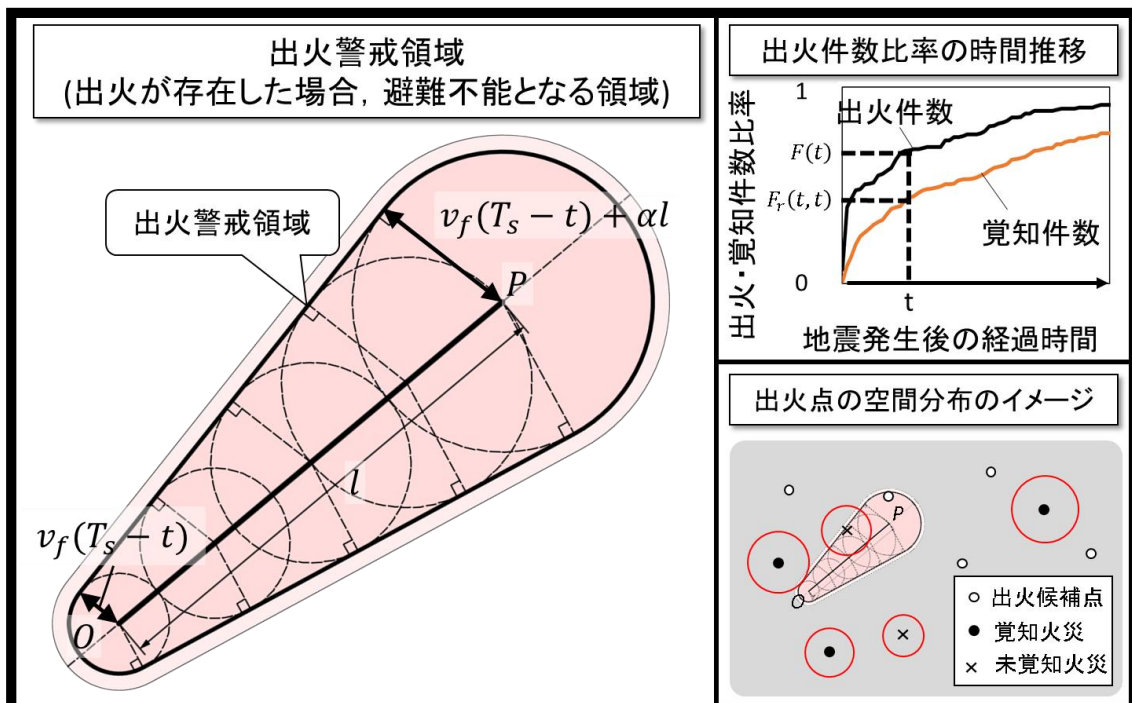
$X_{r_D}(T_s, T_{jg}, t)$: 避難開始時刻が T_s の場合に, 出火時刻 t に対応する出火警戒領域内で, 判断時刻 T_{jg} までに覚知した出火の件数である.

本章では, (3)の確率を避難可能確率と呼び, 出火の件数がポアソン分布に従うものとして, 具体的に導出する.

2.3 未覚知火災への遭遇しにくさを最大化する避難経路選択モデル(P 最大経路)

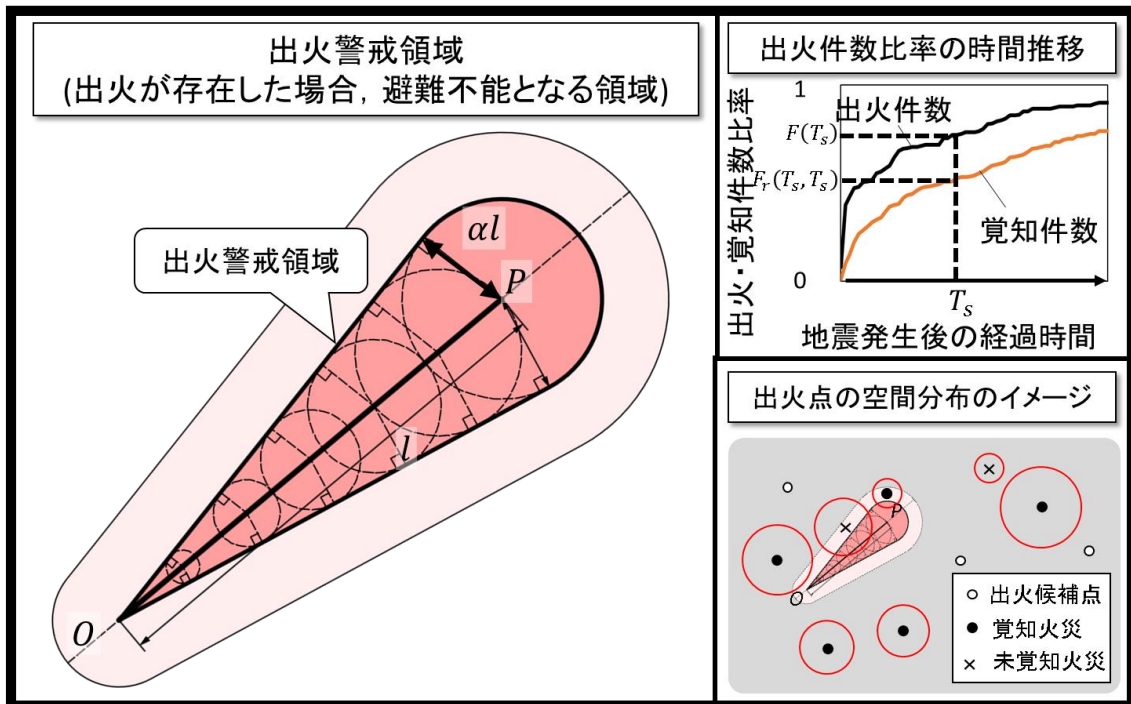


(a) 地震発生と同時の出火に対する出火警戒領域 ($t=0$)

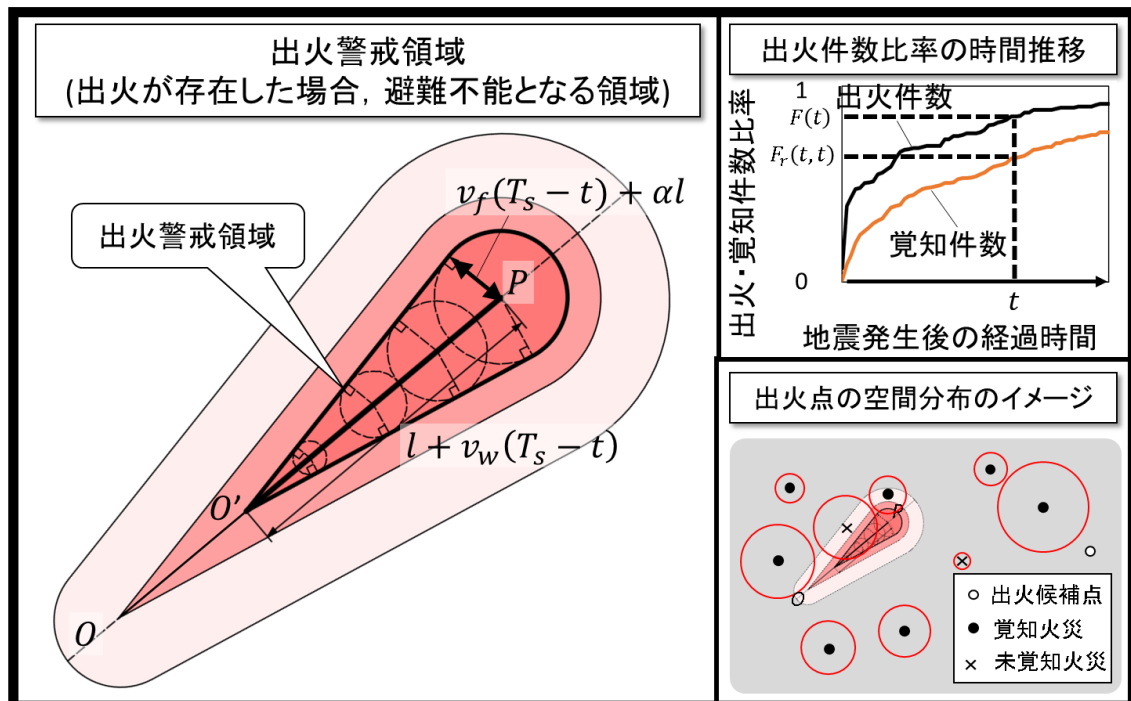


(b) 避難開始前の出火に対する出火警戒領域 ($0 < t < T_s$)

2.3 未覚知火災への遭遇しにくさを最大化する避難経路選択モデル(P 最大経路)



(c) 避難開始と同時の出火に対する出火警戒領域 ($T_s = t$)



(d) 避難開始以降の出火に対する出火警戒領域 ($T_s < t$)

図 2-4 出火時刻が地震発生から避難完了までの出火に対する出火警戒領域の推移

2.3.2 覚知火災情報を考慮した避難可能確率の導出

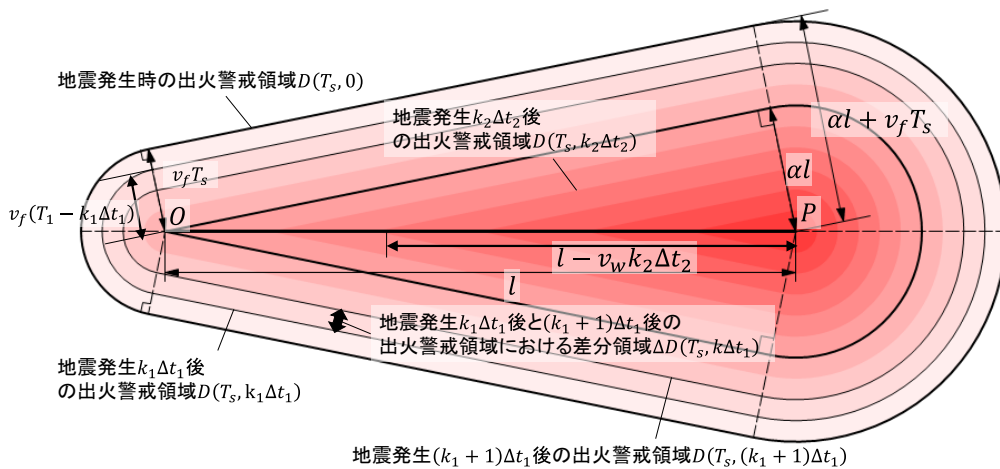
まず、事前避難可能確率 p_{before} を導出する。図 2-4 の出火警戒領域の時間推移からわかる通り、ある時間の出火警戒領域は直後の出火警戒領域を含んでいる。時間 t と時間 $t + \Delta t$ の出火警戒領域の差分領域及びその面積を $\Delta D(T_s, t)$ とすると、出火警戒領域は重なることなく、 $\Delta D(T_s, t)$ によって層状に分割される。すなわち、時間 t までに発生したその差分領域内の出火件数を $X_{\Delta D}(T_s, t)$ と置くと、事前避難可能確率 p_{before} は(4)のように確率の積で表される。

$$p_{before} \equiv P \left[\bigcap_{k=0}^{n-1} X_D(T_s, k\Delta t) = 0 \right] = \prod_{k=0}^{n-1} P[X_{\Delta D}(T_s, k\Delta t) = 0] \quad (4)$$

各時間 t の $X_{\Delta D}(T_s, t)$ が、出火密度 $\rho F(t)$ のポアソン分布に従うとすると、事前避難可能確率 p_{before} は最終的に(5)のように導出される。

$$\begin{aligned} p_{before} \equiv P \left[\bigcap_{k=0}^{n-1} X_D(T_s, k\Delta t) = 0 \right] &= \prod_{k=0}^{n-1} P[X_{\Delta D}(T_s, k\Delta t) = 0] \\ &= \prod_{k=0}^{n-1} e^{-\rho F(k\Delta t)\Delta D(T_s, k\Delta t)} \\ &= e^{-\rho \sum_{k=0}^{n-1} F(k\Delta t)\Delta D(T_s, k\Delta t)} \\ n \rightarrow \infty & \\ &= e^{-\rho \int_0^{T_{fin}} F(t)dD(T_s, t)} \end{aligned} \quad (5)$$

図 2-5 に、 p_{before} 導出における地震発生から避難完了までの出火警戒領域の重ね合わせのイメージを示す。図のように、 O から遠ざかり P に近づくほど、避難に影響する出火点の密度が増大し、 P に近づくにつれて出火警戒領域が広範囲に広がる形状をしている。これは、これは、 O から遠い地点ほど、通過するのに時間を要し、周辺の出火に延焼拡大を許してしまうためである。



出火警戒領域内部の濃淡が、避難に影響を与える出火密度の高低を表している
図 2-5 地震発生から避難完了までの出火警戒領域の重ね合わせのイメージ

2.3 未覚知火災への遭遇しにくさを最大化する避難経路選択モデル(P 最大経路)

この P 側の方に出火警戒領域が広がる程度は、歩行速度 v_w に対する延焼速度 v_f の比 ($\alpha = v_f/v_w$) が大きい程顕著になる。以上のように、1 本のリンクの内部においてリスクの違いが生じることがわかる。

同様に、避難判断確率 p_{det} を導出する。ただし、考慮する出火警戒領域は判断時間までであるため、 $\Delta D(T_s, T_{jg}) = D(T_s, T_{jg})$ である。その点を留意し式展開すると、 p_{det} は(6)のように導出される。

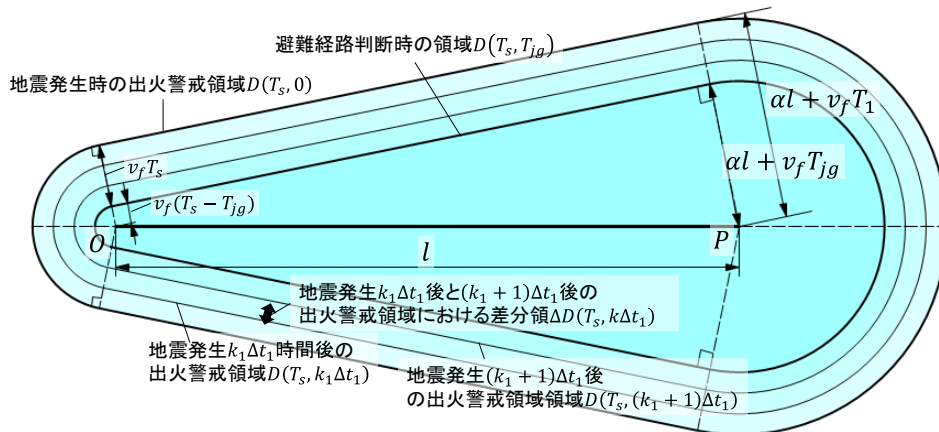
$$\begin{aligned}
 p_{det} &\equiv P \left[\bigcap_{k=0}^{m-1} Xr_D(T_s, k\Delta t) = 0 \right] = P[Xr_D(T_s, T_{jg}) = 0] \prod_{k=0}^{m-2} P[Xr_{\Delta D}(T_s, k\Delta t) = 0] \\
 &= e^{-\rho \{ F_r(T_{jg}, T_{jg}) D(T_s, T_{jg}) + \sum_{k=0}^{m-2} F_r(k\Delta t, T_{jg}) \Delta D(T_s, k\Delta t) \}} \\
 &\quad m \rightarrow \infty \\
 &= e^{-\rho \{ F_r(T_{jg}, T_{jg}) D(T_s, T_{jg}) + \int_0^{T_{jg}} F_r(t, T_{jg}) dD(T_s, t) \}} \quad (6)
 \end{aligned}$$

ここで、 $F_r(t_1, t_2)$ は、 t_1 までに覚知された火災の出火時間に関する累積分布であり、(7)で定義される。

$$F_r(t_1, t_2) \equiv r * P[T_f \leq t_1, T_f + t_{det} \leq t_2] = r \int_0^{t_1} \frac{dF(\tau)}{d\tau} G(t_2 - \tau) d\tau \quad (7)$$

T_f : 出火時刻 [h], t_{det} : 出火から覚地までの所要時間 [h], r : 覚知確率

図 2-6 に p_{det} の導出における地震発生から避難経路判断時までの出火警戒領域の重ね合わせのイメージを示す。図 2-5 とは異なり、考慮される出火は判断時刻 T_{jg} までである。そのため、図中の最も内側の出火警戒領域で避難に影響を及ぼす出火件数密度は一定となる。



出火警戒領域内部の濃淡が、差し引かれる覚知火災の出火密度の高低を表している

図 2-6 地震発生から避難経路判断時までの出火警戒領域の重ね合わせのイメージ

2.3 未覚知火災への遭遇しにくさを最大化する避難経路選択モデル(P 最大経路)

次に、出火警戒領域の面積を導出する。実際の市街地では、建物が密集しているような出火が発生し延焼が及ぶ領域と、避難場所や不燃領域等の火災の影響が及ばない領域がある。本研究では、これらの火災の影響が及ばない領域を通行不能領域と定義する。加えて、避難経路全体の避難可能確率を評価するに際し、連続して道路リンク毎に避難可能確率を計算する場合、両端点周辺で出火警戒領域が重複し、避難経路の避難可能確率を過大に評価する可能性がある。したがって、通行不能領域の境界部分及び経路上の道路リンクの接合部分では、周辺の出火警戒領域から除く必要がある。これを考慮して、簡易的にモデル化した出火警戒領域が図 2-7 である。

本研究では、図 2-7 に示すように、両端点より扇形状に通行不能領域の外側を表現する。すると、出火警戒領域の面積 $D(T_s, t)$ 及び差分領域の面積 $\Delta D(T_s, t)$ は θ_1, θ_2 を出火警戒領域の形状係数として、(8), (9)で表される。

$$D(T_s, t) = \begin{cases} A(l^2 + 2v_w l(T_s - t)) + B(v_w(T_s - t))^2 & (t \leq T_s) \\ A(l + v_w(T_s - t))^2 & (t > T_s) \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta D(T_s, t) = \begin{cases} 2(Alv_w + Bv_w^2(T_s - t))\Delta t - Bv_w^2\Delta t^2 & (t \leq T_s) \\ 2Av_w^2\left(\frac{l}{v_w} + T_s - t\right)\Delta t - Av_w^2\Delta t^2 & (t > T_s) \end{cases} \quad (9)$$

ただし、 A, B, α はそれぞれ、出火警戒領域の形状を表す係数であり、

$$A = \alpha\sqrt{1 - \alpha^2} + \alpha^2 \left(\pi - \left(\frac{\theta_2}{2} + \arccos\alpha \right) \right)$$

$$B = \left(\pi - \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \alpha^2$$

$$\alpha = v_f / v_w$$

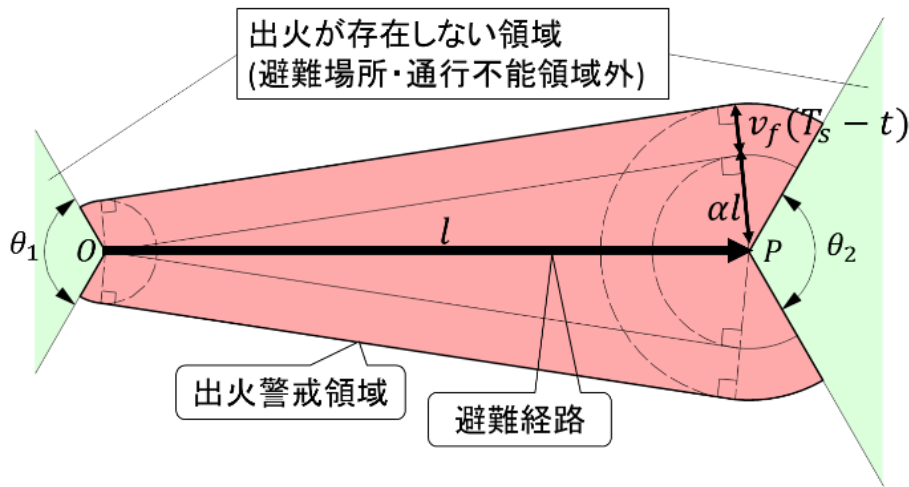


図 2-7 道路リンクの両端点の状態を考慮した出火警戒領域の形状 ($0 < t < T_s$)

2.3 未覚知火災への遭遇しにくさを最大化する避難経路選択モデル(P 最大経路)

以上より、未覚知火災に対する安全性は、覚知後避難可能確率によって(10)で表される。

$$\begin{aligned} p_{eva} &= \frac{p_{before}}{p_{det}} \\ &= e^{-\rho(S_{before}-rS_{det})} \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、

$$S_{before} = \int_0^{T_s} 2(Alv_w + Bv_w^2(T_s - t))F(t)dt + \int_0^{\frac{l}{v_w}} 2Av_w^2\left(\frac{l}{v_w} - t\right)F(t + T_s)dt \quad (11)$$

$$\begin{aligned} S_{det} &= \int_0^{T_{jg}} 2(Alv_w + Bv_w^2(T_s - t))F_r(t, T_{jg})dt \\ &\quad + \left\{ A(l^2 + 2v_w l(T_s - T_{jg})) + B(v_w(T_s - T_{jg}))^2 \right\} F_r(T_{jg}, T_{jg}) \end{aligned} \quad (12)$$

【(10)の意味】

覚知火災情報によって通過可能と判断された *OP* において、警戒すべき出火件数密度が、情報に頼らず *OP* 間を移動する時に対して、その時刻に期待される覚知火災の出火件数密度を差し引いた分であることを意味している。この差し引く分の出火件数密度の程度が、覚知確率 r ($r < 1.0$)によって決定することを表しており、覚知確率が向上するほど、避難誘導における避難経路の信頼性が向上することがわかる。一方、 $r = 0$ の場合、覚知火災分の差し引き分が無くなり、 $F(t) = 1$ のときもは、[石井, 腰塚 1998]のモデルと一致する。

以降、覚知後避難可能確率を単に避難可能確率と呼び、 $p_{eva}(T_{jg}, T_s, l, v_w, \rho, v_f, r, \theta_1, \theta_2)$ 、またはリンク a に関するパラメータを使う意味で $p_{eva}(T_{jg}, T_s, a)$ と書く。

2.3.3 避難可能確率の最大化による避難経路選択

次に、避難可能確率を最大化することで、未覚知火災への遭遇可能性に対して頑健な避難経路の選択方法を示す。(10)を経路上の各道路の始点への到達時刻に対して計算し、その積を計算することで、避難経路の避難可能確率が(13)より得られる。

$$P_{eva}(T_s, F_r, L) \equiv \prod_{(i,j) \in L} p_{eva}(T_{jg}, T_r^{ij}, l^{ij}, v_w^{ij}, \rho^{ij}, v_f^{ij}, r^{ij}, \theta_1^{ij}, \theta_2^{ij}) \quad (13)$$

T_s : 避難開始時刻 [h]

F_r : 覚知火災 f_r の集合

L : 避難開始地点から避難場所までの経路

(i, j) : 経路 L 上の道路リンク i, j : 経路 L を構成しているリンクの始点及び終点のノード

T_r^{ij} : 道路リンク (i, j) の始点ノード i への到達時間 [h]

l^{ij} : 道路リンク (i, j) の長さ [m]

v_w^{ij} : 道路リンク (i, j) を通過するときの平均歩行速度 [m/h]

ρ^{ij} : 道路リンク (i, j) 周辺の期待出火件数密度 [件/m²]

v_f^{ij} : 道路リンク (i, j) 周辺の出火における平均延焼速度 [m/h]

r^{ij} : 道路リンク (i, j) 周辺の覚知確率

$\theta_1^{ij}, \theta_2^{ij}$: 道路リンク (i, j) における出火警戒領域の形状係数

2.3 未覚知火災への遭遇しにくさを最大化する避難経路選択モデル(P 最大経路)

ここで、 T_r^{ij} は、避難開始時刻に始点ノード*i*までの移動にかかる時間を足した値より、(14)で計算される。

$$T_r^{ij} = T_s + \sum_{(k,h) \in L_{s,i}} l^{k,h} / v_w^{k,h} \quad (14)$$

$L_{s,i}$: 経路*L*のうち、避難開始地点からノード*i*までの部分経路

ただし、覚知火災による各道路の閉塞時間よりも早く、閉塞地点を通過することが条件であり、(15)の条件が与えられる。

$$T_r^{ij} < T_{b,i,j}(F_r) - \frac{l_{b,i,j}(F_r)}{v_w^{i,j}} \quad (15)$$

$T_{b,i,j}(F_r)$: 覚知火災集合 F_r の火災によって、道路リンク(*i,j*)が閉塞する最早時刻 [h]

$l_{b,i,j}(F_r)$: 始点ノード*i*から覚知火災集合 F_r によって最早に閉塞する地点までの長さ [m]

また、本研究では、歩行速度、延焼速度、覚知確率は避難圏域で一律の値とし、道路リンク周辺の期待出火件数密度 ρ_{ij} [件/m²]については、避難圏域の期待出火件数密度 ρ [件/m²]に対して、道路リンクが重なる各通行不能領域 *k* の非耐火建物密度の平均で重み付けして、(16)のように定めた。

$$\rho^{ij} = \frac{\sum \rho_{b,k}}{n_{ij}} \frac{1}{\rho_b} \rho \quad (16)$$

ρ_b : 地域の非耐火建物密度 [件/m²]

$\rho_{b,k}$: 道路リンクが重なっている通行不能領域 *k* における非耐火建物密度[件/m²]

n_{ij} : 道路リンク(*i,j*)に重なっている通行不能領域の数

$\theta_1^{ij}, \theta_2^{ij}$ については、過大なリスク評価を防ぐために、始点側の θ_1 を0、終点側の θ_2 を 2π とすることで調整し、通行不能領域の境界が始点もしくは終点となる場合、 θ_1 もしくは θ_2 を π にすることで調整している。

最後に、(13)を最大化することで、未覚知火災に対して頑健な避難経路が得られる。

$$P_{eva}(T_s, F_r, L^*) = \max_L P_{eva}(T_s, F_r, L)$$

L^* : 避難可能確率を最大化した避難経路

T_s : 避難開始時刻 [h]

F_r : 覚知火災の集合

【避難経路の探索手法】

本研究で探索される避難経路の探索手法の概要について簡単に紹介する。図 2-8 に避難経路の避難可能確率の計算イメージを示す。道路リンク(1,2)は通行不能領域 A に含まれるため通行不能領域 A の期待出火件数密度を、同様に、道路リンク(2,3)は通行不能領域 A と通行不能領域 B の期待出火件数密度の平均で避難可能確率が計算される。このようにして、避難場所までの道路リンクについて、順次、避難可能確率を計算し乗じていく。図からもわかる通り、出火警戒領域の大きさ(避難可能確率の値)は、避難者の通過時刻に依存するため、避難可能確率 $P_{eva}(T_s, F_r, L)$ を計算するには、避難開始地点を起点に計算する必要がある。

2.3 未覚知火災への遭遇しにくさを最大化する避難経路選択モデル(P 最大経路)

そこで、避難開始地点を起点に、避難場所までの予想されるコスト(ヒューリスティックコスト)を推定しながら避難経路を探索する手法である A*探索法([Peter E. Hart, et al. 1968])を採用する。A*探索法とは、ゴールまでのコストを推定値により評価し、推定値が低い経路から優先的に探索していく経路探索アルゴリズムである。あるノード n を通過する経路のうち、コストが最小となる経路のコストを $f(n)$ と置くと、 $f(n)$ はノード n までのコスト $g(n)$ とノード n からゴールまでのコスト $h(n)$ の和($f(n) = g(n) + h(n)$)として表される。このとき、 $g(n)$ は起点から辿って計算するため、真のコストが得られるが、 n 以降の経路が未確定なため、 $h(n)$ を厳密に得られることは困難である。そのため、 $h(n)$ の推定値であるヒューリスティック関数 $\hat{h}(n)$ を用いて、最小コスト経路の探索を行う。このとき、以下の条件を満たす場合、計算は収束し、経路が最適解であることが保証される。

- (1) $\hat{h}(n) \leq h(n)$ (許容的であること)
- (2) $\hat{h}(n) \leq cost(n, m) + \hat{h}(m)$ (無矛盾であること)

ここで、 $cost(n, m)$ はリンク (n, m) のコスト

避難可能確率は積であり最大化指標であるため、ノード n までの経路 L_n について、

$$g(n) = -\ln(P_{eva}(T_s, F_r, L_n))$$

とすることで、適用できる。

また、本研究で採用したヒューリスティックコストは煩雑であり、また、開発途上の計算上都合をつけたものであるため仔細は省略するが、このヒューリスティックコストに 0 を採用しても、計算速度は劣るものの上記の条件は満たされる。

なお、以降の 2.4 および 2.5 で紹介される避難経路も、同様に A*探索法を採用している。

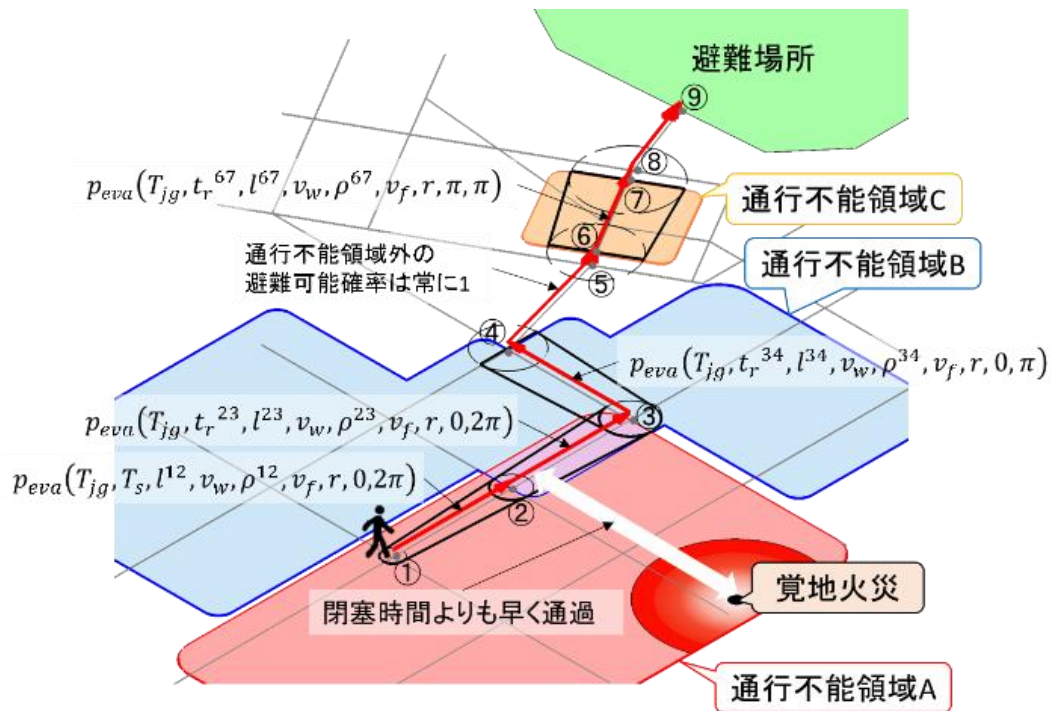


図 2-8 避難経路における避難可能確率の計算イメージ

2.4 延焼予測のばらつきに対して余裕を最大化する避難経路選択モデル

(最大余裕経路)

本節では、延焼予測のばらつきに対して頑健な避難経路の選択モデルを構築する。本モデルでは、覚知火災情報に基づく閉塞道路を避けつつ、覚知火災の延焼範囲に対して十分に離れた経路を選択する方法を試みる。

2.4.1 問題設定

地震火災時におけるリアルタイム避難誘導では、覚知火災に基づき延焼拡大予測を行い、避難者が火災に遭遇しないよう経路を選択することが重要である。最遅避難理論による経路や最短経路、前節のP最大経路のように避難場所に到達するための効率を重視した経路の場合、火災の近傍を通過する経路を顧みずに選択される。一方、延焼拡大予測には不確実なばらつきが存在するため、予測よりも早くに延焼が到達し、避難者が火災に遭遇するリスクが存在する。しかしながら、地震火災の事例も少ないため、延焼拡大予測のばらつきの様相を明らかにすることは困難である。そこで、本モデルでは、なるべく大きな延焼予測のばらつきに対しても通過可能な経路を選択することで、延焼予測のばらつきに対して避難経路を頑健化する。

まず、予測上の延焼速度と実際の延焼速度の差に注目し、避難者が避難可能である条件について考察する。図 2-9 は、ひとつの覚知火災とひとつの道路リンクについて、避難者の通過時と道路閉塞を伴う火災前線の関係を示した図である。ここで焦点となるところは、避難者が道路リンクを通過する時の火災前線である。火災前線が道路リンクに到達していなければ、その経路は利用可能である。すなわち、予測の延焼速度 \hat{v}_f に対して増分速度 Δv^* を考えると、実際の延焼速度 v_f が(17)を満たすとき、避難者がその道路を通過できる。

$$v_f < \hat{v}_f + \Delta v^* \quad (17)$$

このとき、避難者が避難可能であるために許容される延焼速度誤差の限界値(以下「延焼速度誤差の許容限界」)について、避難者による閉塞地点の通過時刻との関係より定式化を試みる。

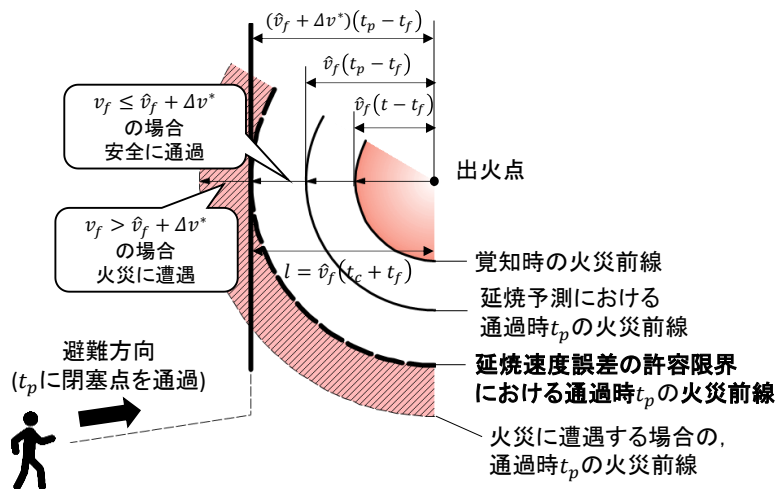


図 2-9 延焼予測誤差の許容限界に対する火災前線

2.4 延焼予測のばらつきに対して余裕を最大化する避難経路選択モデル(最大余裕経路)

2.4.2 避難余裕性の導出

(18)のように、許容限界の平均延焼速度 v_f^* に対して、予測平均延焼速度 \hat{v}_f と延焼速度誤差の増分速度 Δv^* の和が等しい時、延焼速度誤差の増分速度 Δv^* が延焼速度誤差の許容限界であるである。

$$v_f^* = \hat{v}_f + \Delta v^* \quad (18)$$

ここで、対象とする覚知火災の出火時刻を T_f 、出火点と閉塞点の直線距離を l (以下「延焼距離」と置き、火災前線による閉塞時間と避難者による閉塞点の通過時刻 T_p の等式より、 Δv^* は(19)で求められる。

$$\begin{aligned} T_f + \frac{l}{v_f^*} = T_p &\Leftrightarrow T_f + \frac{l}{(\hat{v}_f + \Delta v^*)} = T_p \\ &\Leftrightarrow \Delta v^* = \frac{l}{T_p - T_f} - \hat{v}_f \end{aligned} \quad (19)$$

一方、予測される閉塞時刻 \hat{T}_c と延焼距離 l の関係より、(20)が得られる。

$$\hat{T}_c = \frac{l}{\hat{v}_f} + T_f \Leftrightarrow l = \hat{v}_f(\hat{T}_c - T_f) \quad (20)$$

(20)を(19)に代入し、両辺を予測平均延焼速度で除すると、(21)が導かれる。

$$\frac{\Delta v^*}{\hat{v}_f} = \frac{\hat{T}_c - T_p}{T_p - T_f} \quad (21)$$

(21)の値が意味することを解説する。(21)の左辺は、予測平均延焼速度に対する延焼速度誤差の許容限界の比(以下「許容誤差比」)である。例えば、予測平均延焼速度が 100 [m/h]、(21)の値が 1 である場合、200 [m/h]までの延焼速度が避難可能であるために許容される。一方、(21)の右辺は、分母に、対象とする覚知火災の出火後から避難者が閉塞点を通るまでの猶予時間、分子に、通過から道路閉塞までの猶予時間である。すなわち、(21)は左辺の許容誤差比という延焼速度誤差に対する安全性を、覚知火災情報と避難者の通過時刻によって評価できることを表している。以上より、本研究では、本指標の右辺を覚知火災に対する避難の余裕を表す指標という意味として「避難余裕性」と呼び、避難余裕性を最大化する避難経路を「最大余裕経路」と呼ぶ。

次に、全覚知火災に対する道路リンク (i, j) の避難余裕性を定義する。本研究では、覚知火災毎に避難余裕性を評価し、その最小値を道路リンク (i, j) の避難余裕性とする。覚知火災の集合を F_r 、そのうち一火災を f と置く。ある時間 T_{si} に道路リンクの始点 i へ到達したときの避難余裕性 $M_{ij}(T_{si}, F_r)$ は、(22)で定義する。

$$M_{ij}(T_{si}, F_r) \equiv \min_{f \in F_r} \frac{T_{cij}(f) - (T_{si} + T_{pij}(f))}{T_{si} + t_{pij}(f) - T_f(f)} \quad (22)$$

$T_f(f)$: 火災 f の出火時刻 [h]

$T_{cij}(f)$: 火災 f による道路リンク (i, j) の閉塞時刻 [h]

$t_{pij}(f)$: ノード i から火災 f による閉塞点を通るまでの所要時間 [h]

2.4.3 避難余裕性の最小値最大化による避難経路選択

道路リンクで求められた避難余裕性を用いて、避難経路の避難余裕性を最適化する方針をモデル化する。本研究では、避難経路上における避難余裕性の最小値を最大化する、マクシミン原理による最適化を行う事で最大余裕経路を得る。マクシミン原理を採用することで、最も遭遇しやすい覚知火災に対する安全性を最大化することを意図している。

各道路リンクの始点*i*への到達時間 T_{si} は、避難開始時間 T_s とノード*i*までの移動時間 T_r^{ij} の和で表される。この到達時間 T_{si} を用いて、各道路リンクで(22)の避難余裕性を計算し、その最小値を避難経路上の避難余裕性とする。ゆえに、避難経路の避難余裕性 $M(T_s, F_r, L)$ は(23)で定義される。

$$M(T_s, F_r, L) \equiv \min_{(i,j) \in L} M_{ij}(T_s + T_r^{ij}, F_r) \quad (23)$$

T_s : 避難開始時刻

F_r : 覚知火災 f_r の集合

L : 避難開始地点から避難場所までの経路

(i, j) : 経路 L 上の道路リンク

T_r^{ij} : 道路リンク (i, j) の始点ノード*i*への到達時間 [h]

ここで、 T_r^{ij} は、 P 最大経路を導出した時と同様に、避難開始時刻に始点ノード*i*までの移動にかかる時間を足した値より、(24)で計算される。

$$T_r^{ij} = T_s + \sum_{(k,h) \in L_{s,i}} l^{k,h} / v_w^{k,h} \quad (24)$$

$L_{s,i}$: 経路 L のうち、避難開始地点からノード*i*までの部分経路

l^{ij} : 道路リンク (i, j) の長さ [m]

v_w^{ij} : 道路リンク (i, j) を通過するときの平均歩行速度 [m/h]

P 最大経路と同様に、覚知火災による各道路の閉塞時間よりも早く通過することが条件であり、(25)の条件が与えられる。

$$T_r^{ij} < T_{b,i,j}(F_r) - \frac{l_{b,i,j}(F_r)}{v_w^{ij}} \quad (25)$$

$T_{b,i,j}(F_r)$: 覚知火災集合 F_r の火災によって、道路リンク (i, j) が閉塞する時刻 [h]

$l_{b,i,j}(F_r)$: 始点ノード*i*から覚知火災集合 F_r の火災によって閉塞する地点までの長さ [m]

最後に、(25)の条件の下(26)のように $M(T_s, F_r, L)$ を最大化する経路探索を行うことで、最大余裕経路 L^* が得られる。

$$M(T_s, F_r, L^*) = \max_L M(T_s, F_r, L) \quad (26)$$

2.4 延焼予測のばらつきに対して余裕を最大化する避難経路選択モデル(最大余裕経路)

【避難経路の探索手法】

図 2-10 に避難経路上の避難余裕性と最大余裕経路の考え方の模式図を示す。①を地点避難開始地点とすると、避難開始地点から避難場所に向かって、各道路リンクの閉塞地点別に、閉塞時刻と通過時刻より避難余裕性を計算する。この時、各道路リンクの避難余裕性をプロットしたイメージが図下のグラフである。ある経路上のうち避難余裕性の最小値が避難経路の避難余裕性となる。こうした計算をあらゆる経路について求め、避難余裕性が最大となる避難経路を探索する。

P 最大経路と同様に、最大余裕経路の探索においても A*探索法を採用する。以上の最小値最大化であることを考慮し、ノード n までの経路 L_n について、 $f(n) = \max\{-g(n), -h(n)\}$, $g(n) = M(T_s, Fr, L_n)$ とすることで避難余裕性の最小値最大化を評価できる。また、ヒューリスティックコスト $h(n)$ には、何らかの推定値を設定してもよいが、非常に大きな値(999999)を設定することで探索可能である。

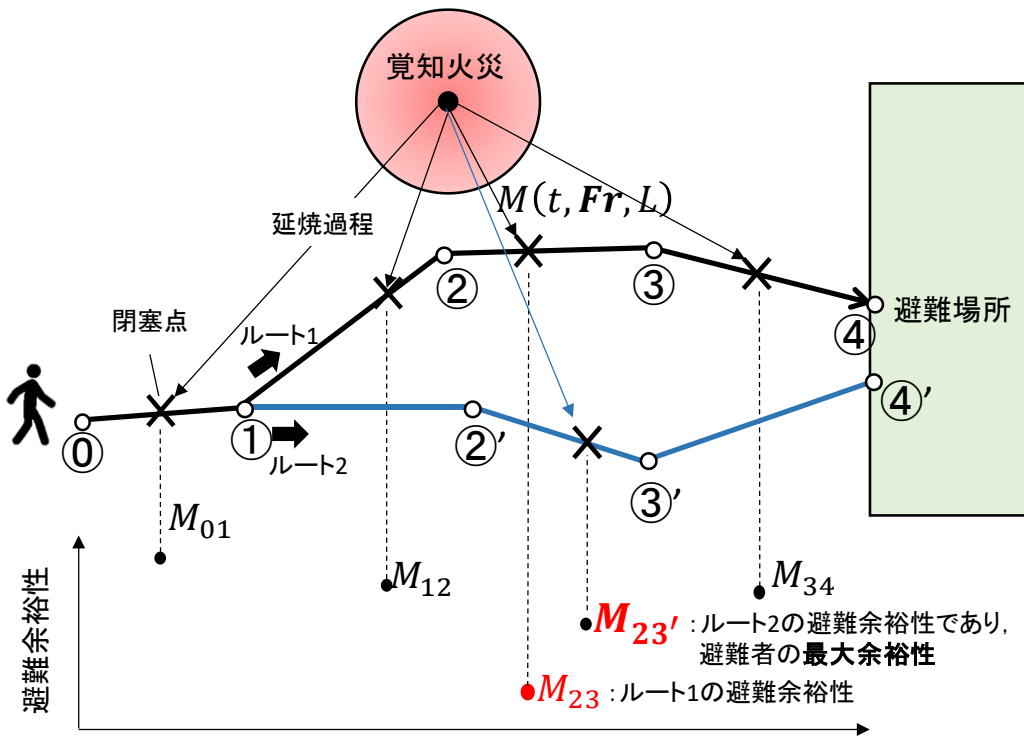


図 2-10 避難経路の避難余裕性と最大余裕経路の考え方

2.5 避難余裕性の確保を考慮した避難可能確率最大化(M*-P 最大経路)

2.4 節では、最短経路やP 最大経路において覚知火災による道路閉塞に対して火災近傍を通過することを厭わないことを問題点として、覚知火災に対して十分に余裕を確保する最大余裕経路をモデル化した。本節では、P 最大経路及び最大余裕経路の長所・短所を考察した上で、それぞれの長所を生かす避難経路を検討し、火災情報の不完全性に対して頑健な避難経路をモデル化する。

避難余裕性は、避難の安全のために許容できる延焼予測の精度を指標化した値であるため、ある要求値を下回る状態は著しく危険であり、その値以上の確保は、安全上大きな意味を持たないと考えられる。一方、避難可能確率は確率値であるため、大きいほど安全であり、最大化は安全上意義がある。しかしながら、前述のとおり、避難可能確率最大化では、避難余裕性を考慮していないため、覚知火災に対して非常に余裕のない経路となりかねない。そこで、確保する必要がある避難余裕性(以下「必要余裕性」)を設定し、必要余裕性を満たす条件下における避難可能確率を最大化する経路(以下、M*-P 最大経路)を検討する。図 2-11 に P 最大経路・最大余裕経路・M*-P 最大経路における頑健性の特徴の違いを示す。これにより、延焼予測のばらつきに対して安全を確保しつつ、未覚知火災に対しても安全性が高い避難経路が期待できる。ただし、必要余裕性が確保できない場合、最大余裕経路に切り替え、避難経路が残存する限り、避難経路の探索を継続できるようにした。

以上を整理すると、M*-P 最大経路は以下(27), (28)を満たす経路 L^* となる。

$$\begin{cases} P_{eva}(T_s, Fr, L^*) = \max_L P_{eva}(T_s, Fr, L) & (M(T_s, Fr, L^*) \geq M^*) \\ M(T_s, Fr, L^*) = \max_L M(T_s, Fr, L) & (M(T_s, Fr, L^*) < M^*) \end{cases} \quad (27)$$

T_s : 避難開始時刻 [h]

Fr : 覚知火災の集合

L : 避難開始地点から避難場所までの経路

M^* : 必要余裕性

$P_{eva}(T_s, Fr, L)$: 避難経路 L の避難可能確率

$M(T_s, Fr, L)$: 避難経路 L の避難余裕性

$$T_r^{ij} < T_{b,i,j}(Fr) - \frac{l_{b,i,j}(Fr)}{v_w^{i,j}} \quad ((i,j) \in L^*) \quad (28)$$

i, j : 道路リンクの始点及び終点のノード

(i, j) : i, j で構成される道路リンク

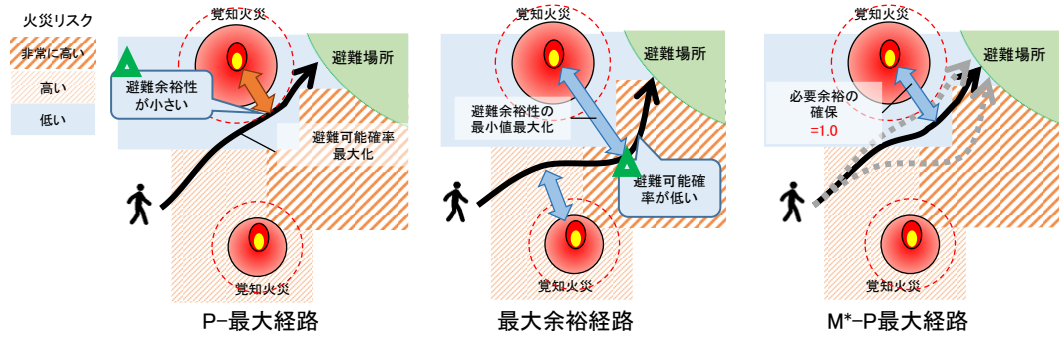
$v_w^{i,j}$: 道路リンク (i, j) を通過するときの平均歩行速度 [m/h]

T_r^{ij} : 道路リンク (i, j) の始点ノード i への到達時刻

$T_{b,i,j}(Fr)$: 覚知火災集合 Fr の火災によって、道路リンク (i, j) が閉塞する時刻 [h]

$l_{b,i,j}(Fr)$: 始点ノード i から覚知火災集合 Fr の火災によって閉塞する地点までの長さ [m]

2.5 避難余裕性の確保を考慮した避難可能確率最大化(M*-P 最大経路)

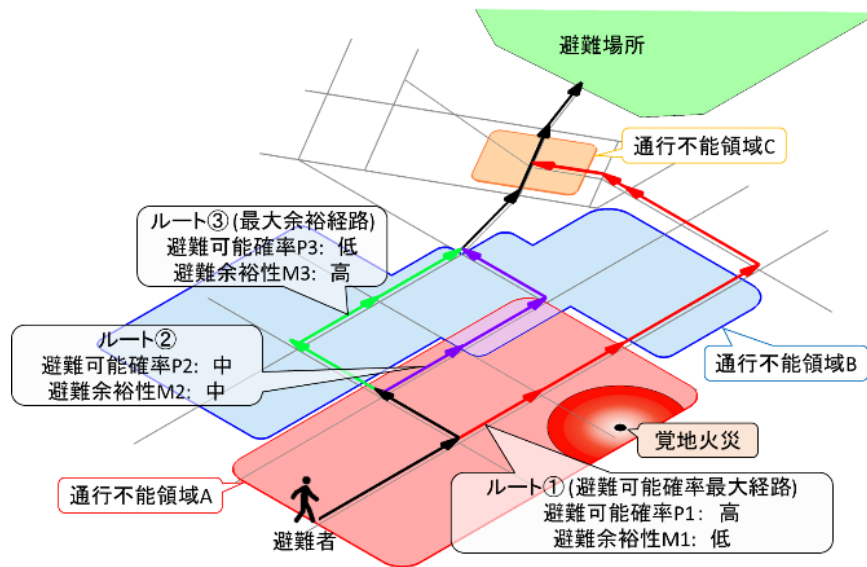


ただし、必要余裕性を 1.0 としている

図 2-11 P 最大経路・最大余裕経路・M*-P 最大経路における頑健性の特徴の違い

【避難経路の探索手法】

図 2-12 に必要余裕性を考慮した避難可能確率最大経路の例を示す。ルート①は、最も避難可能確率が高い経路であるが、覚知火災の近くを通過するため、避難余裕性は最も低い。この経路が、必要余裕性を満たしている場合、ルート①が選択される。必要余裕性を満たしていない場合、次に避難可能確率が高いルート②が候補となる。ルート②も必要余裕性を満たしていない場合には、次点で避難可能確率が高い経路が候補となり、必要余裕性が確保されるまで繰り返される。どの経路も必要余裕性を満たしていない場合、最終的に最大余裕経路(ルート③)が選択される。



上記の図において、避難余裕性・避難可能確率が以下の関係であるとする。

避難余裕性：ルート③>ルート②>ルート①

避難可能確率：ルート①>ルート②>ルート③

必要余裕性 M^* と選択されるルートとの関係は以下の通りである。

- ・どの経路でも M^* を満たす場合 ($M^* \leq M1$)：ルート①を選択
- ・一部の経路で M^* を満たす場合 ($M1 < M^* \leq M2$)：ルート②を選択
- ・最大余裕経路のみ M^* を満たす又は全ての経路で M^* を満たさない場合 ($M3 \leq M^*$)：ルート③を選択

図 2-12 必要余裕性を考慮した避難可能確率最大経路の模式図

2.6 避難経路の動的更新による頑健化

避難者が取得した時点の避難情報は、取得にかかる時間だけ古い情報である。したがって、このようなタイムラグを考慮して避難経路を計算し、避難情報を更新する必要がある。

避難者へ避難情報を伝達する手段は、一般に、システムから避難者へ能動的に情報を与える PUSH 型と、避難者が必要な情報をシステムにアクセスし取得する PULL 型の情報伝達に分類される([大原 2015])。本節では、避難開始に伴う避難情報伝達と避難途上における避難経路の動的更新の関係に着目し、PUSH 型・PULL 型のそれぞれの伝達手段において、情報伝達時間に関するモデル化を行う。

2.6.1 情報伝達の種類による避難情報伝達モデル

PUSH 型・PULL 型における避難情報伝達モデルを構築し、避難者が参照する避難情報がいつの情報なのか、避難開始時と避難途上での避難経路更新時について整理する。本研究では、[東京消防庁 2019]の情報伝達過程に従い、収集・加工・伝達・受容の流れについて、本研究の避難誘導に当てはめて検討を行う。

a) PUSH 型による避難情報伝達モデル

図 2-13 に、PUSH 型による避難情報伝達における情報の伝達過程と経過時間のモデルを示す。まず、前提として、 Δt 間隔で覚知火災情報が整理される。このとき整理が完了した時刻を覚知時刻と呼ぶ。前回の覚知時刻 $(n-1)\Delta t$ から Δt 時間に消防等の収集活動や住民の通報によって収集された火災情報は、避難誘導システムによって $n\Delta t$ に集約される。その後、 t_{cpt} 時間をかけ、避難経路等の避難情報が加工される。その後、 t_t 時間をかけ、避難者に避難情報が伝達される。避難者は、 t_j 時間をかけ避難情報を受容し、さらに避難準備等に要する分、 t_{de} 時間後に避難を開始する。したがって、実際に避難者が避難開始時に参照する避難情報は、避難開始時刻から $t_{cpt} + t_t + t_j + t_{de}$ 時間だけ過去の覚知情報に基づいて計算されているといえる。

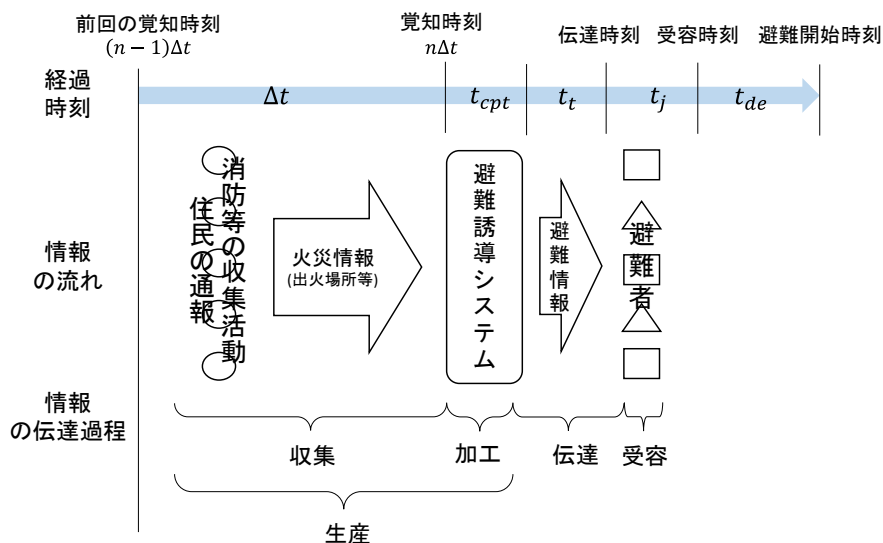


図 2-13 PUSH 型による避難開始時の避難情報伝達

次に、PUSH 型の避難情報による避難途上における経路更新について検討する。図 2-14 に、PUSH 型の避難経路更新におけ、情報判断間隔および避難者の避難経路更新タイミングに関するモデルを示す。 Δt 間隔で覚知情報が更新される場合、避難者は、 T_s 時間に t_d 時間だけ遅延した情報で避難を開始した後、覚知情報の更新の度に、 t_{upd} 時間後に新しい避難経路を理解し、避難経路を変更する。ただし、 t_{upd} は図 2-13 における避難経路の計算による時間 t_{cpt} 、避難経路の更新情報の伝達に要する時間 t_t 、避難者が更新情報を理解するのに要する時間 t_j の和である。以上のように、PUSH 型では、覚知時刻を基準として伝達に要する時間だけタイムラグが生じた後、避難者に情報伝達される。

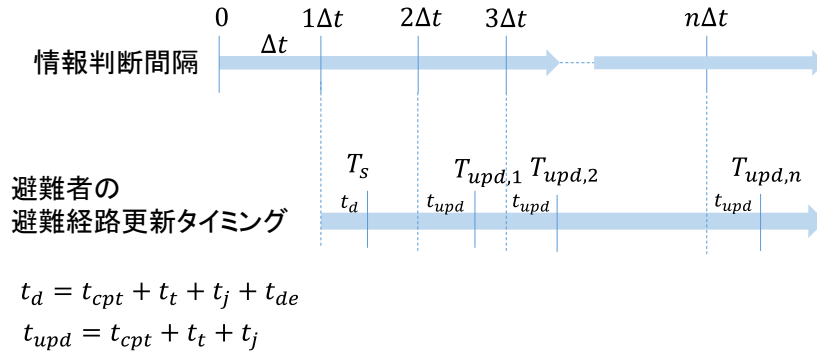


図 2-14 PUSH 型の避難経路更新

b) PULL 型による避難情報伝達モデル

図 2-15 に、PULL 型による避難情報伝達における情報の伝達過程と経過時間のモデルを示す。避難者は情報要求時刻 T_{pl} にシステムにアクセスし、時刻 T_s に避難開始するために必要な避難情報を取得することを想定する。避難者は、 t_{acs} 時間をかけて所在地等の避難者情報をシステムに入力する。システムは、避難者情報取得後 t_{cpt} 時間をかけて避難経路を計算し、避難情報として加工する。その後、 t_t 時間をかけ、避難者に避難情報が伝達される。避難者は、 t_j 時間をかけ避難情報を受容し、避難準備のために t_m 時間後の時刻 T_s に避難を開始する。ゆえに、PULL 型による避難情報伝達において、避難者は、 $t_m > 0$ になるように、避難開始時刻 T_s を設定しなければ、適切な避難経路を取得することができない。

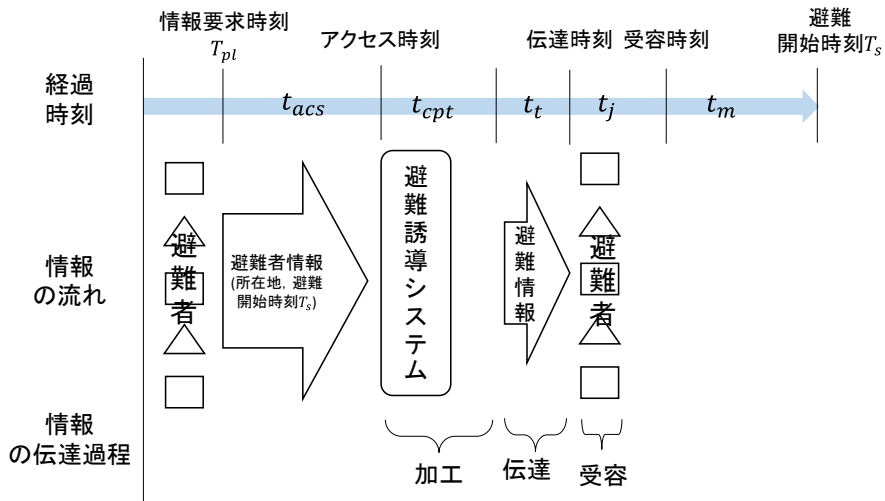


図 2-15 PULL 型における避難開始時の避難情報伝達

また、避難経路は、アクセスした段階の覚知情報によって計算される。そのため、アクセスした段階の覚知火災情報は、 $[(T_{pl} + t_{acs})/\Delta t] * \Delta t$ に集約された情報である。ただし、 $[\cdot]$ はガウス記号であり、 \cdot を越えない整数を意味する。以上より、実際に避難者が避難開始時に参照する避難情報は、避難開始時刻から $t_{cpt} + t_t + t_j + t_m + (T_{pl} + t_{acs} - [(T_{pl} + t_{acs})/\Delta t] * \Delta t)$ 時間だけ過去の覚知情報に基づいて計算されているといえる。

次に、PULL 型の避難情報による避難途上における経路更新について検討する。図 2-16 に、PULL 型の避難経路更新における、情報判断間隔および避難者の避難経路更新タイミングに関するモデルを示す。避難者は、避難開始後、新しい避難経路情報を取得するために、任意の時刻 T_{pl} に t_{acs} 時間をかけて所在地等の避難者情報をシステムに入力し、アクセス時刻 T_{ac} に入力完了する。その後避難者は、 t_{upd} 時間後に新しい避難経路を理解し、避難経路を変更する。ただし、 t_{upd} は図 2-13 における避難経路の計算による時間 t_{cpt} 、避難経路の更新情報の伝達に要する時間 t_t 、避難者が更新情報を理解するのに要する時間 t_j の和である。

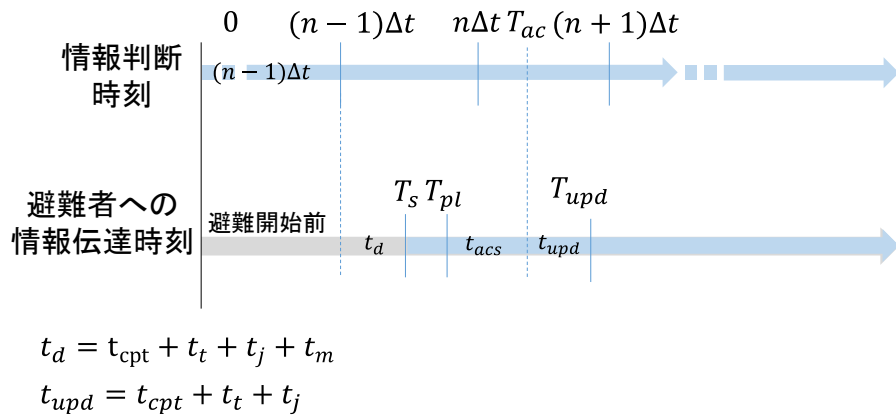


図 2-16 PULL 型の避難経路更新

以上より、表 2-1 に、PUSH 型/PULL 型それぞれにおける覚知時刻から情報更新までのタイムラグを整理する。何段階にももの情報伝達過程を経て避難者へ反映される。したがって、それぞれのタイムラグを考慮して、避難経路の構築が必要である。また、PULL 型では、PUSH 型とは異なり、覚知時刻とアクセス時刻の差だけ、より大きなタイムラグが存在する。システム上で個人の避難経路の計算を常に行うことはマシンパワーの問題として、非現実的であることから、PULL 型によって逐次避難経路を計算することが必要となるが、このタイムラグを小さくするためにも、覚知間隔 Δt をなるべく小さくする環境づくりが必要であると推察される。

表 2-1 PUSH 型・PULL 型における覚知時刻から避難情報更新までのタイムラグ

	避難開始時	避難途上における経路更新時
PUSH 型	$t_{cpt} + t_t + t_j + t_{de}$	$t_{cpt} + t_t + t_j$
PULL 型	$t_{cpt} + t_t + t_j + t_m$ $+ (T_{pl} + t_{acs} - [(T_{pl} + t_{acs})/\Delta t] * \Delta t)$	$t_{cpt} + t_t + t_j$ $+ (T_{pl} + t_{acs} - [(T_{pl} + t_{acs})/\Delta t] * \Delta t)$

2.6.2 避難情報の伝達時間を考慮した動的な避難情報更新モデル

避難経路の更新を行う場合、経路の始点およびその始点への到達時刻の設定が必要である。換言すると、避難情報の動的更新とは、ある時刻にある地点を出発する避難経路への更新を考える必要がある。本項では、避難開始前の避難情報の更新と避難途上における経路更新の2つに分け、経路の始点およびその始点への到達時刻の設定方法をモデル化する。

Step 1 避難開始時の避難情報更新

ある判断時刻において、表 2-1 のタイムラグを考慮し、各避難開始地点の避難開始時刻を設定し、各リンクの通過可能判定及び、通過可能であれば避難可能確率および避難余裕性を計算することで、前節までに示した避難経路を求める。

Step 2 経路途上における避難経路更新

避難者が避難途上で立ち止まったり、新経路の始点を通りすぎてしまい後戻りしたり、もしくは、更新前の経路から新経路へ変更する間、一時的に経路情報を見失ったりすることを防ぎ、かつ、最も安全になるように避難経路を求める方法を検討する。上述の不具合を防ぎ、効果的に経路更新を行うためには、更新前の経路と新経路が一続きになるように調整する必要がある。これに合わせた新経路の始点と、その始点の出発時刻を推定する必要がある。

図 2-17 に、避難途上における新経路への更新の流れを示す。表 2-1 のタイムラグを考慮し、避難者が避難経路を理解し先の経路を変更する時刻である反映時刻を推定する。避難者は更新前の避難経路に沿って避難していると仮定し、現在時刻および反映時刻の差、現在の所在地を基に、反映時刻における避難者の所在地 X を推定する。その後、所在地 X の最寄ノード Y の推定を行い、反映時刻と所在地 X を基に最寄ノード Y への到達時刻 T を推定する。最後に、最寄ノード Y を始点、時刻 T を出発時刻とした新経路を求める。

以上の過程を経て新経路を構築することで、避難者が新経路を把握し新経路に切り替えるタイミングで到達している交差点と新経路の始点、また交差点への到達時刻と始点の出発時刻が一致し、更新前の経路から新経路への滑らかな経路変更が可能となる。

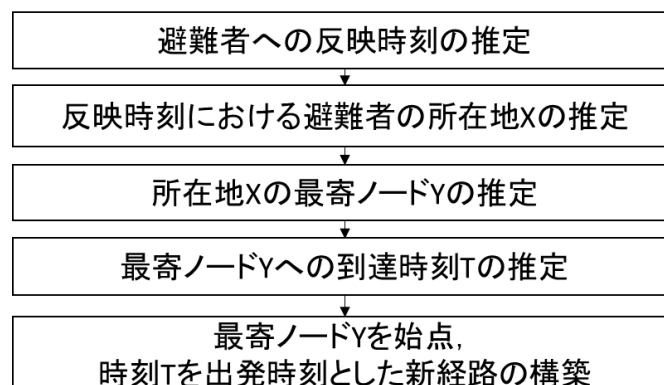


図 2-17 避難途上における新経路の更新フロー

Step 1 で求めた避難経路で避難開始し、避難途上で Step 2 の方法で新経路に更新しながら避難場所へむかう一連の避難の流れの模式図を図 2-18 に示す。以上のように、避難者に伝達されるタイミングを見計らうことで、避難者の避難軌跡は一続きとなり、各更新タイミング時に、最も安全と評価される避難経路を常に選択し続けることが可能である。

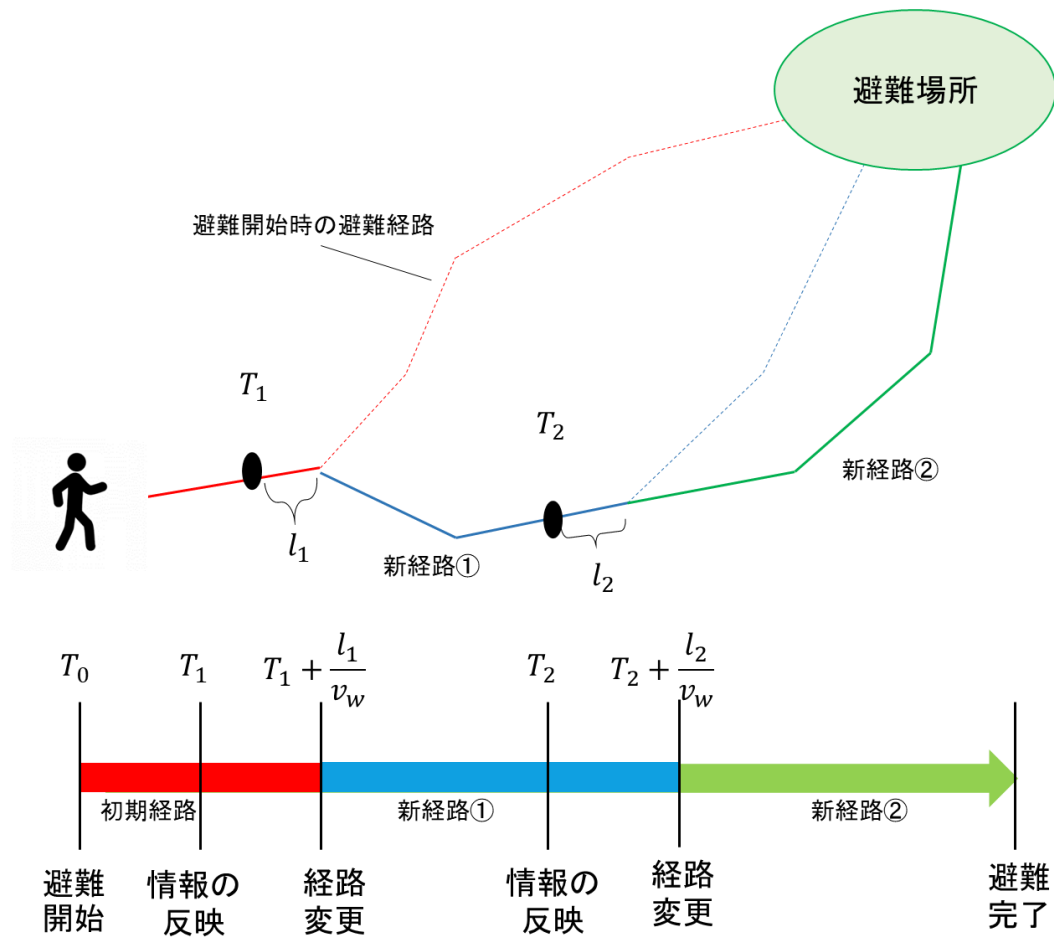


図 2-18 避難途上における避難経路の動的更新の模式図

2.7 小括

本章では、動的避難経路による頑健な避難誘導方策について検討し、効果を評価するための基礎モデルを構築した。

はじめに、本研究の前提となる避難誘導のシナリオを設定し、火災への遭遇可能性による避難誘導の頑健性の定義した。その後、この枠組みにおいて動的誘導経路による避難誘導の頑健化のための提案を行った。

次に、動的誘導経路のモデルを構築するために、未覚知火災への遭遇可能性に対する頑健性である避難可能確率を定義し、これを最大化する P 最大経路を定式化した。その後、延焼予測のばらつきに対する頑健性として避難余裕性を定義し、避難経路上の最も余裕のない地点を最大化する最大余裕経路を定式化した。本研究では、 P 最大経路及び最大余裕経路の特性を活かし、その折衷案である M^* - P 最大経路を定義し、未覚知火災と延焼予測のばらつき両方に対する頑健な経路を提案した。加えて、これらの経路を避難途上において逐次的に更新する方法として、情報の伝達時間及び経路の反映時間について、 $PUSH$ 型・ $PULL$ 型による情報伝達の違いに着目し、更新前後の経路において立ち止まりや後戻り、経路を見失うことなく、一続きの経路となるような更新方法について定式化した。

以上のモデルは、数学的に都合の良い仮定を設けて構築され、実用には向いていない。しかしながら、地震火災時の不完全情報の特性を反映させたモデルとなっており、不完全情報下の避難誘導に知見を与えるモデルと言えよう。次章では、本章で構築した動的誘導経路による避難誘導の頑健性を検証するためのリアルタイム避難誘導シミュレーションモデルを構築し、モンテカルロ法による本誘導手法の特徴について検証・考察を行う。

第3章

リアルタイム避難誘導シミュレーションによる動的誘導経路の火災遭遇リスク低減効果の検証

第3章 リアルタイム避難誘導シミュレーションによる 動的誘導経路の火災遭遇リスク低減効果の検証

3.1 本章の目的と構成

本章では、動的誘導経路による火災遭遇リスクの低減効果について評価検証することを目的として、リアルタイム避難誘導シミュレーションを開発し、単純な格子状市街地を対象としたモンテカルロ法による火災遭遇リスクの低減効果検証を行う。

3.2 節では、避難者が火災に遭遇するか避難場所に到達するまで、地震火災の出火・延焼、覚知情報の更新、避難者への情報伝達を一定時間間隔で継続させるリアルタイム避難誘導シミュレーションモデルを構築する。避難者を取り巻く地震火災及び覚知情報のふるまいを簡易的にモデル化し、避難誘導に理路整然に従う避難者の避難行動をモデル化する。その後、シミュレーションに必要なパラメータの整理と一連のシミュレーション実験の流れを示す。

3.3 節では、3.2 節で構築したリアルタイム避難誘導シミュレーションについて、出火・覚知状況が異なる複数のパターンについて試行し、その避難誘導結果に基づきモンテカルロ法によって避難誘導効果を評価する指標について紹介する。本研究では、避難開始時に伝達される避難経路の性能として伝達された避難経路の避難可能確率の平均像を評価し、また、全試行に対する火災に遭遇した回数の比率(火災遭遇率)によって火災遭遇リスクの低減効果を評価する。

3.4 節では、動的誘導経路の火災遭遇リスクの低減効果を評価するための実験について概要を示す。本節では、実験目的を示し、対象とする火災リスクが均質な格子状市街地のモデルについて紹介する。その後、実験条件として各種パラメータの値を示す。

3.5 節では、リアルタイム避難誘導の火災遭遇リスクの低減効果について、基礎的な評価を行いその特性について把握する。

3.2 リアルタイム避難誘導シミュレーション

動的誘導経路によって、避難者が火災に遭遇しにくくなるのかについて検証を行うために、地震火災、覚知情報および避難者の行動を再現し、火災への遭遇判定を行うシミュレーション実験を実施する。リアルタイム避難誘導シミュレーションを行う場合、避難者を取り巻く地震火災、避難誘導に必要な情報を収集する覚知、誘導対象となる避難者の避難行動及びそれらの一連の事象を発生させる市街地を数理モデルとして規定する必要がある。本節では、2.2節で示した仮定と整合性の合うシミュレーションモデルの構築を行う。

図 3-1 にリアルタイム避難誘導シミュレーションの全体像を示す。本シミュレーションでは、道路ネットワーク、避難場所、通行不能領域(延焼が及びうる領域)及び建物(実市街地のみ)で構成される市街地データ上で実施され、地震火災は通行不能領域上で面的に拡大し、避難者は道路ネットワーク上を移動する。地震火災シミュレーションでは、通行不能領域上でランダムに出火点が生成され、地震発生後の時間遅れとともに出火・延焼拡大が生じ、道路ネットワーク上のリンクが閉塞され使用不能となる。覚知情報シミュレーションでは、地震火災シミュレーションの一部の出火について覚知の判定が行われ、更新間隔時間で定期的に地震火災シミュレーションから覚知火災情報へ抽出される。この覚知火災情報に基づきリアルタイム避難誘導が適用され、設定された避難者について、避難誘導に従う避難が実行される。地震火災シミュレーションの延焼・道路閉塞に対して、避難者が火災へ遭遇するかの判定を行い、火災に遭遇するか・避難場所に到達するまでシミュレーションが継続される。

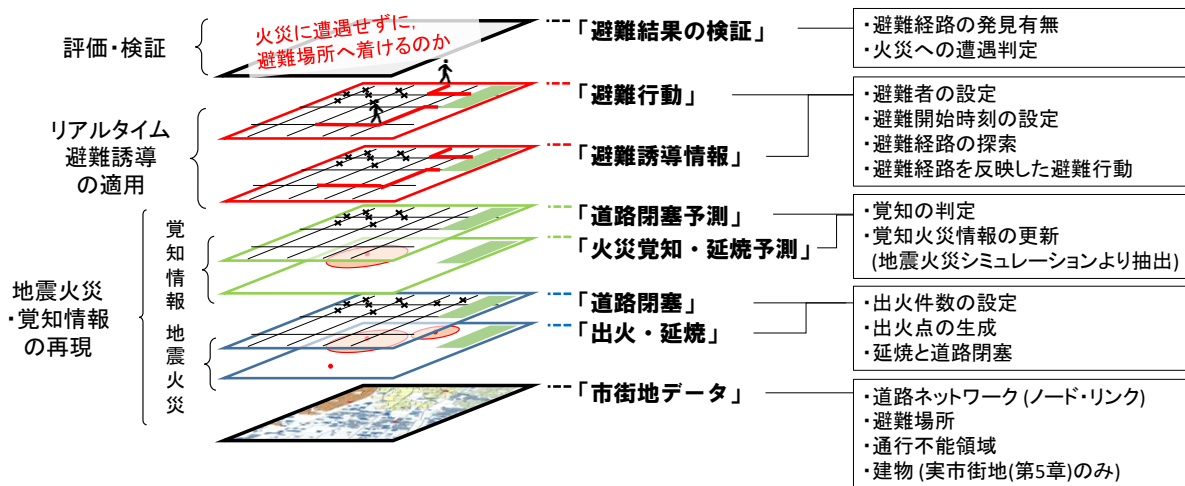


図 3-1 リアルタイム避難誘導シミュレーションの全体像

3.2.1 地震火災シミュレーション

シミュレーション上での地震火災および出火覚知の振る舞いについて仮定するモデルを設定する．基本的には 2.2 節で仮定した避難誘導のシナリオと同じだが，避難シミュレーションを実施するにあたり，出火件数，出火時刻，道路の遮断時刻および覚知時刻を具体的に算定する必要がある，これらを算定するモデルを設定する．

a) 出火件数の設定

出火件数 n は、期待出火件数密度をパラメータとするポアソン分布に従うとする．したがって、期待出火件数密度を ρ [件数/m²]，避難圏域の面積を S [m²]と置くと出火件数分布は(29)で表される．

$$P[n = x] = \frac{(\rho S)^x}{x!} e^{-\rho S} \quad (29)$$

シミュレーションの最初に、(29)に従う乱数を生成し出火件数を決定する．ただし、実際の市街地は建物が密集している領域と疎な領域で偏りがある．そのため、避難圏域の全体の面積を用いると、建物密度が疎な市街地では、建物数に対して過剰な出火件数が設定されてしまう．そこで、本研究では、通行不能領域と呼ぶ延焼が及ぶ領域の面積を S とすることで、市街地の火災リスクを反映させた出火件数を設定した．本章で実施する火災リスクが一般的な格子状市街地を対象としたシミュレーションでは避難場所を除く市街地全体を通行不能領域とし(3.4.2 で詳述)，第 5 章で実施する建物が不均質に分布する実市街地を対象としたシミュレーションでは、耐火造を除く建物から生成される延焼クラスタに基づき通行不能領域を生成する(4.2 で詳述)．

b) 出火点の生成

a)で定めた出火件数 n の出火点セット F を用意する．本研究では、避難圏域上にランダムに出火点を生成する．格子状市街地では通行不能領域上の x 座標及び y 座標の値を無作為に n 件設定し出火点 f を配置した．一方、実市街地では、耐火造ではない建物を無作為に n 件選択し、その重心に出火点 f を配置した．その後、各出火点の出火時刻について、阪神淡路大震災のデータを用いて推定した累積分布関数を使用し、本分布に従って設定した．

本研究で用いる出火時刻分布は、[日本火災学会 1996]に基づいて推定したモデルを用いる．兵庫県南部地震では、地震発生直後に揺れに伴う多くの出火が生じ、しばらく時間が経過した後、電気系統の復旧等によって緩やかに出火が発生している．この特徴を表す分布として、事象が生じる時間をモデル化した指数分布を仮定し、24 時間以内に発生した火災を対象として、最尤法によるパラメータの推定を行い、(30)が得られた．

$$F_e(t) = 1 - e^{-0.376t} \quad (30)$$

ここで、(30)を t に関する式に変形すると、(31)が得られる．

$$t = -\left(\frac{1}{0.376}\right) \ln[1 - F_e(t)] \quad (31)$$

本研究では、0 から 1 の間の乱数を $F_e(t)$ に設定し、(31)に代入することで、各出火点に出

火時刻を与えた。ただし、出火時刻を定めるに際し、互いの出火点に出火時刻を迎える前に別の延焼が及ぶことがないように設定する必要がある。 i 件目の出火の出火時刻を定めるに際し、 $i-1$ 件目までの各出火点の座標へ、それぞれの地点の出火時刻前に延焼が及ばないように、もしくは、 i 件目の出火が生じる前に $i-1$ 件目までの各出火の延焼が i 件目の出火座標へ及ばないように設定しなければならない。すなわち、 i 件目の出火時刻は、 $i-1$ 件目までのすべての出火に対して(32)を満たす必要がある。

$$|t_{fi} - t_{fk}| < \frac{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_k|}{v_f} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, i-1) \quad (32)$$

$\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_k$: i 番目及び k 番目の出火点の座標

t_{fi}, t_{fk} : i 番目及び k 番目の出火時刻 [h]

v_f : 延焼速度 [m/h]

(32)の制約を設けることで、ランダムな出火点の空間分布という仮定が崩れてしまうが、本研究では $1.0 [\text{m}^2]$ あたり高々 4.0×10^6 件程度までのシミュレーションを行っていない、影響は非常に小さいと考えられる。

c) 延焼と道路閉塞

各火災の延焼動態を仮定し、各道路リンクの閉塞時刻を求めるモデルを検討する。出火点リストの各出火は、出火時刻を迎えた後、等速度かつ同心円状に延焼すると仮定し、各出火が存在する通行不能領域に重なっている道路リンクを閉塞する。すなわち、各道路リンク (i, j) の遮断時刻は、各出火からの閉塞時刻の中で最も早い時刻であり、(33)より求められる。

$$T_{b,i,j} = \min_{f \in F} \left(l_{i,j,f} / v_f + t_f \right) \quad (33)$$

$T_{b,i,j}$: 道路リンク (i, j) の閉塞時刻 [h]

$l_{i,j,f}$: 道路リンク (i, j) と出火点 f の直線距離 [m]

(実市街地の場合には複数の通行不能領域が存在し、出火点が存在する通行不能領域が異なる場合、 $l_{i,j,f} = \infty$ [m])

v_f : 出火点 f の延焼速度 [m/h]

t_f : 出火点 f の出火時刻 [h]

閉塞した道路リンクは通行不可となる。

3.2.2 覚知情報シミュレーション

本研究では、各出火はある一定の確率でいずれ覚知(住民によって発見)され、覚知される出火は、出火後、ある覚知所要時間後に覚知される。覚知された出火は、出火時刻および出火座標が把握される。この覚知される確率を「覚知確率」とし住民の火災発見能力とみなせる。以上より、ある出火点が出火後 t 時間までに覚知されている確率 $G(t)$ は(34)となる。

$$G(t) = r * Prob\{t_r \leq t\} \quad (34)$$

r : 覚知確率 t_r : 覚知所要時間 [h]

本来、 r は出火時刻や出火位置に応じて変化すると考えられるが、本研究では、簡便化のため定数とする。本研究では、覚知時間が従う確率分布を、[藤井, 糸井川 2005]のモデルを援用する。

a) 覚知時間分布

震災時には、住民による通報(住民の 119 番通報または駆けつけ通報)や、消防職員による情報収集活動(高所見張りや巡回)によるもの、近年では、火災センサーによる自動通報など、多様な手段が考えられる。しかしながら、兵庫県南部地震における地震時の主たる覚知手段は、住民による「119 番通報」および「駆けつけ通報」であり、[藤井, 糸井川 2005]は、それぞれの通報による覚知時間の確率分布を、兵庫県南部地震の火災データに基づいてモデル化している。

本研究では、住民の 119 番通報または駆けつけ通報いずれかによって覚知される確率として、(35)によって覚知所要時間の累積分布関数を表現する。

$$Prob\{t_r \leq t\} = \frac{r_{119}}{r_{119} + r_{run}} * P_{119}(t) + \frac{r_{run}}{r_{119} + r_{run}} * P_{run}(t) \quad (35)$$

r_{119} : 119 番通報の割合

r_{run} : 駆けつけ通報の割合

$P_{119}(t)$: 119 番通報による覚知所要時間の累積分布 [h]

$P_{run}(t)$: 駆けつけ通報による覚知所要時間の累積分布 [h]

b) 119 番通報による覚知所要時間の累積分布の導出

[藤井, 糸井川 2005]は、住民による 119 番通報を、ベルヌーイ試行としてモデル化している。住民は、火災を発見後直ちに 119 番通報を行うものとし、回線の障害や輻輳等ではない場合、繰り返し通報を試みる。つまり、繰り返し通報を試みたときに、何回目に電話がつながるのかを幾何分布によってモデル化することで、1 回あたりの通報時間に基づいて、覚知時間の分布を推定できる。

ここで、1 回の 119 番通報によって電話がつながり、通報が成功する確率を p と置くと、 i 回目までに通報が成功する確率は(36)で表される。

$$Prob\{\text{通報回数} \leq i\} = \sum_{k=1}^i p * (1-p)^{k-1} = 1 - (1-p)^i \quad (36)$$

119 番通報を 1 回試みる時間が一定時間 Δt とすると、通報回数 $\cong t_{det}/\Delta t$ であるから、これを(36)に代入すると覚知所要時間の分布となり、(37)で表される。

$$\begin{aligned} Prob\{\text{通報回数} * \Delta t \leq i\Delta t = t\} &= Prob\{t_{det} \leq t\} \\ &= 1 - e^{-\alpha t} \\ &\equiv P_{119}(t) \end{aligned} \quad (37)$$

$$\alpha = \ln \left[\frac{1}{1-p} \right] * \frac{1}{\Delta t}$$

結局、119 番通報による覚知所要時間の累積分布 $P_{119}(t)$ は、パラメータ α によって規定される。[藤井, 糸井川 2005]は、兵庫県南部地震において地震発生後 90 分以内に出火し、覚知方法が確認されている 65 件の火災データを用いて、非線形回帰分析を行うことで α を推定し、(38)を得ている。

$$P_{119}(t) = 1 - e^{-0.0558*60*t} \quad (R^2 = 0.973) \quad (38)$$

c) 駆けつけ通報における覚知時間分布

住民による駆けつけ通報は、住民は出火を発見後、119 番通報を試み、つながないと判断した時点(以下、見切り時刻 t_g)で開始されるものとする。ここで、出火場所から消防署所までの距離が大きいほど初期消火や 119 番通報に費やす時間が大きいと仮定すると、見切り時刻出火場所から消防署所までの直線距離を l とすると、見切り時刻 t_g は距離 l による一次近似として、(39)で表される。

$$t_g = a * 1.3 * l + b \quad (39)$$

ただし、 a, b は見切り時間パラメータ、1.3 は[腰塚, 小林 1983]による直線距離と道路距離の関係から求まる距離補正係数である。また、出火地点から消防署所までの移動時間 t_m は、住民の移動速度を v_w とすると(40)である。

$$t_m = 1.3 * \frac{l}{v_w} \quad (40)$$

したがって、駆けつけ通報における覚知時間 t_{run} は t_g と t_m の和であり、となり、出火地点と消防署所の距離 l の関数として(41)で表される。

$$t_{run} = t_g + t_m = a * 1.3 * l + b + 1.3 * \frac{l}{v_w} \quad (41)$$

一方で、出火地点はランダムに定まるため、消防署所との距離は不確実である。したがって、駆けつけ通報における覚知時間は、出火地点と消防諸所の距離 l の確率分布によって(42)のように定まる。

$$P_{run}(t) \equiv Prob\{t_{run} \leq t\} = Prob\left\{l \leq \frac{v_w(t-b)^2}{1.3 * (1 + av_w)}\right\} \quad (42)$$

また、出火地点と消防諸所の距離 l の分布は、消防諸所から半径 l の円内に火出地点が存在する確率であるため、その出火件数がポアソン分布に従うとすると(43)になる。

$$Prob\{l \leq L\} = 1 - e^{-\pi\rho L} \quad (43)$$

(43)の L に、 $\frac{v_w(t-b)^2}{1.3*(1+av_w)}$ を代入することで、駆けつけ通報における覚知時間分布 $P_{run}(t)$ が(44)のように求まる。

$$P_{run}(t) = 1 - e^{-\pi\rho \frac{v_w(t-b)^2}{1.3*(1+av_w)}} \quad (44)$$

(44)における ρ を兵庫県南部地震における出火密度(3.14×10^{-7} [件/m²])とし、119番通報と同様に、火災データとの非線形回帰分析を行うことで(44)の各パラメータが求まる。

$$v_w = 78.3 * 60[\text{m/h}]$$

$$a = 0.0003 * 60[\text{m/h}]$$

$$b = 0 [\text{h}]$$

$$R^2 = 0.939$$

d) 覚知火災情報の更新

[藤井, 糸井川 2005]によると、当時の覚知手段のうちわけでは、119番通報が約0.25、駆けつけ通報が0.30である。以上より、(35)~(38)、(44)を代入することで、本研究で扱う覚知時間分布は(45)となる。

$$Prob\{t_r \leq t\} = \frac{0.25}{0.55} * (1 - e^{-0.0558*60*t}) + \frac{0.30}{0.55} * \left(1 - e^{-\pi\rho_f \frac{v_w(t-b)^2}{1.3*(1+av_w)}}\right) \quad (45)$$

シミュレーション開始時、地震火災シミュレーションの各出火点 f について、覚知確率 r に対して覚知可能か設定する。その後、覚知可能と設定された各出火点 f について、(45)に従い覚知所要時間を設定する。

シミュレーション開始後、(46)のように出火時刻に覚知所要時間を足した値が、現在時刻よりも早い火災によって、覚知火災情報を更新する。

$$F_r \leftarrow \{f \in F | t_f + t_r \leq T\} \quad (46)$$

F_r : 覚知火災の集合

t_f : 出火時刻 [h]

t_r : 覚知所要時間 [h]

T : 現在時刻 [h]

その後、覚知火災情報 F_r に基づき、地震火災シミュレーションの結果を抽出し各道路の閉塞時刻を(47)で計算する。

$$T_{br,i,j} = \min_{f \in F_r} \left(l_{i,j,f} / v_f + t_f \right) \quad (47)$$

$T_{br,i,j}$: 覚知火災情報に基づく道路リンク (i,j) の閉塞時刻 [h]

$l_{i,j,f}$: 道路リンク (i,j) と出火点 f の直線距離 [m]

(属する通行不能領域が異なる場合, $l_{i,j,f} = \infty$ [m])

v_f : 出火点 f の延焼速度 [m/h]

t_f : 出火点 f の出火時刻 [h]

最後に、図 3-2 に、本シミュレーションによる地震発生後の経過時間に対する出火件数比率・覚知件数比率を示す。

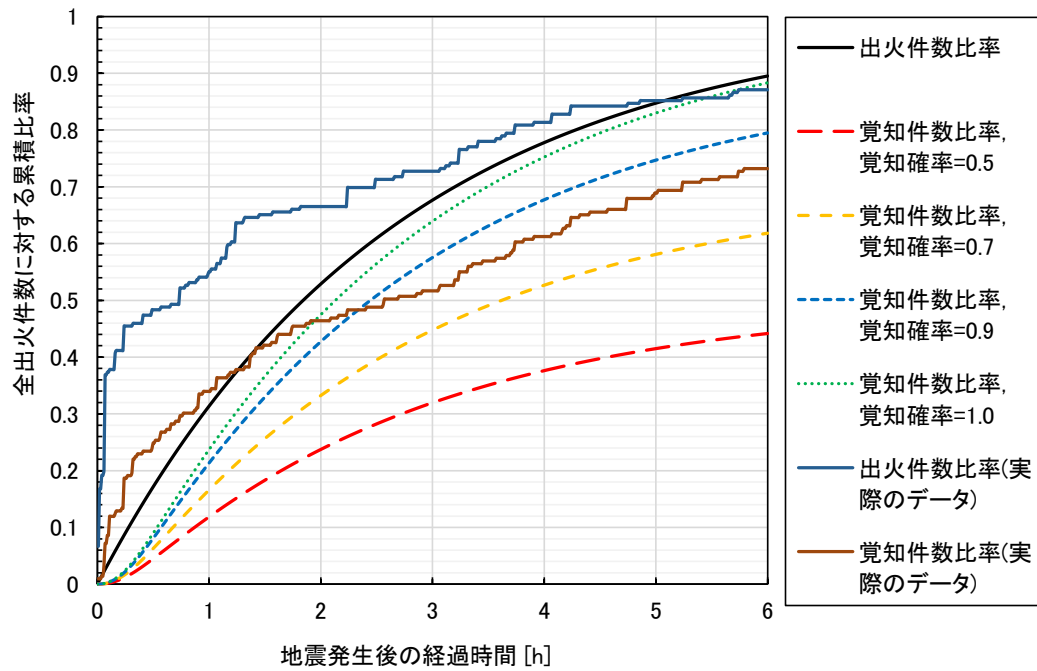


図 3-2 地震発生後の経過時間に対する出火件数比率・覚知件数比率

3.2.3 避難行動シミュレーション

避難者は、シミュレーション開始後、ある避難開始地点に設定され避難開始時刻まで待機し、避難開始時刻を迎えたとき、避難場所まで避難誘導に従って避難場所まで移動する。このとき、火災に遭遇するか避難場所に到達するまで、避難経路の更新と移動を繰り返す。

a) 避難者の避難開始地点・避難開始時刻の設定

避難者は、あらかじめ定められた避難開始時刻 T_c に、避難ネットワーク上の定められた地点 \mathbf{x}_{st} より、避難誘導に従って避難を開始する。

$$T_s = T_c, \quad \mathbf{x}_i = \mathbf{x}_{st}, \quad T_i = T_s$$

T_s : 避難開始時刻 [h]

\mathbf{x}_i : 避難者が所在する避難ネットワーク上の位置

T_i : 避難者が \mathbf{x}_i に所在する時刻 [h]

b) 避難誘導情報に基づく避難者の移動

避難開始後は、火災に遭遇するまで避難場所へ移動を行う。本研究では、覚知火災情報の更新に合わせて情報伝達時間の遅れがないとして、最寄りノードからの避難経路が更新される。最寄りのノードへの到達時刻を評価し、現在時刻の位置を逐次更新していく。

$$T_j = T_i + l_{i,j}/v_w$$

T_j : 最寄りノードへの到達時刻 [h]

T_i : 避難者が \mathbf{x}_i に所在する時刻 [h]

$l_{i,j}$: 最寄りノードまでの距離 [m]

v_w : 避難者の歩行速度 [m/h]

c) 避難完了の判定

火災に遭遇するか避難場所に到達した場合、避難完了とする。

$$T_j < T_{b,i,j} \rightarrow \delta_{suc} = 0$$

$$T_i < T_l(F, \mathbf{x}_i) \rightarrow \delta_{suc} = 0$$

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_{goal} \rightarrow \delta_{suc} = 1$$

$T_l(F, \mathbf{x}_i)$: 全火災に対する \mathbf{x}_i の最遅避難時刻 [h]

δ_{suc} : 火災に遭遇した場合 0, 火災に遭遇しなかった場合 1

ただし、避難開始時刻までに全ての経路が途絶される場合、換言すると、覚知火災情報に対して避難開始時刻が最遅避難時刻を迎えている場合、避難経路未発見として考える。

$$T_i < T_l(F_r, \mathbf{x}_i) \rightarrow \delta_{find} = 0$$

$T_l(F_r, \mathbf{x}_i)$: 覚知火災情報に基づく \mathbf{x}_i の最遅避難時刻 [h]

δ_{find} : 避難経路が発見できなかった場合 0, 発見できた場合 1

3.2.4 シミュレーション実験の流れ

図 3-3 にシミュレーションの流れを示す。表 3-1 に示すシミュレーションケースのパラメータを設定し、シミュレーションを実施する。シミュレーション開始後、想定する地震火災の出火点を生成し、避難ネットワーク上の各道路における閉塞時刻を設定する。その後、表 3-2 に示す避難誘導規範に関するパラメータを有する避難者を設定し、地震発生後($T = 0$)からシミュレーションを開始し、避難者が火災に遭遇するか避難場所に到達するまで、現在時刻を一定間隔で進めつつ($T \leftarrow T + \Delta t$)、シミュレーションを継続する。

各時間ステップの初めに、覚知火災情報を更新する。覚知時間が現在時刻よりも早い火災に対して、道路閉塞時刻を計算する。避難開始時刻を迎えたとき、覚知火災情報に基づいた誘導経路を探索し、避難を開始する。ただし、避難開始時刻以前に、覚知火災情報に対して最遅避難時刻を迎えていた場合、避難経路発見不能とし、シミュレーションを終了する。避難開始後、誘導経路に従って避難を実施する。各時間ステップにおいて、その時刻までに到達できるノードまで移動し、覚知火災情報に基づき次点ノードからの避難経路を更新する。シミュレーション終了後、表 3-3 に示す評価項目について記録し、シミュレーションを終了する。

表 3-1 シミュレーションケースにおけるパラメータ

カテゴリ	記号	呼称, 定義 [単位]
市街地モデル (3.4.2 で詳述)	-	対象避難圏域
	x_s	避難開始地点, 避難者の起点となる避難ネットワーク上の位置
	-	延焼クラスタで想定する風速 [m/h]
地震火災 シミュレーション	ρ	期待出火件数密度, 生成する出火点数密度の期待値 [件/m ²]
	v_f	延焼速度, 出火後の延焼拡大速度 [m/h]
覚知情報 シミュレーション	r	覚知確率, 各出火点がシミュレーション中で覚知される確率
	Δt	情報更新間隔, 覚知火災リストを更新する時間間隔 [h]
避難行動 シミュレーション	v_w	歩行速度, 避難者が経路上を移動する速度 [m/h]
	T_s	避難開始時刻, 避難者が避難開始地点を出発する時刻 [h]

表 3-2 避難誘導規範

項目	定義
避難経路	覚知火災情報に基づいて避難者の移動する経路の選択方法 (最短経路, P 最大経路, 最大余裕経路, M*-P 最大経路)
必要余裕性	M*-P 最大経路において確保すべき避難余裕性
経路更新の有無	避難開始後の避難途上で, 覚知火災情報に基づき 経路を更新する場合「有」, しない場合に「無」

表 3-3 シミュレーション結果の評価対象

カテゴリ	記号	定義
避難結果	δ_{find}	経路探索可否, 避難開始時刻に経路が探索できれば 1, 探索できなければ 0
	δ_{suc}	火災遭遇有無, 火災に遭遇した場合 0, 遭遇していない場合 1
避難開始時の 避難経路情報	D_s	経路長 [m] ($\delta_{find} 1 =$ の場合のみ)
	P_s	避難可能確率 ($\delta_{find} 1 =$ の場合のみ)
	M_s	避難余裕性 ($\delta_{find} 1 =$ の場合のみ)

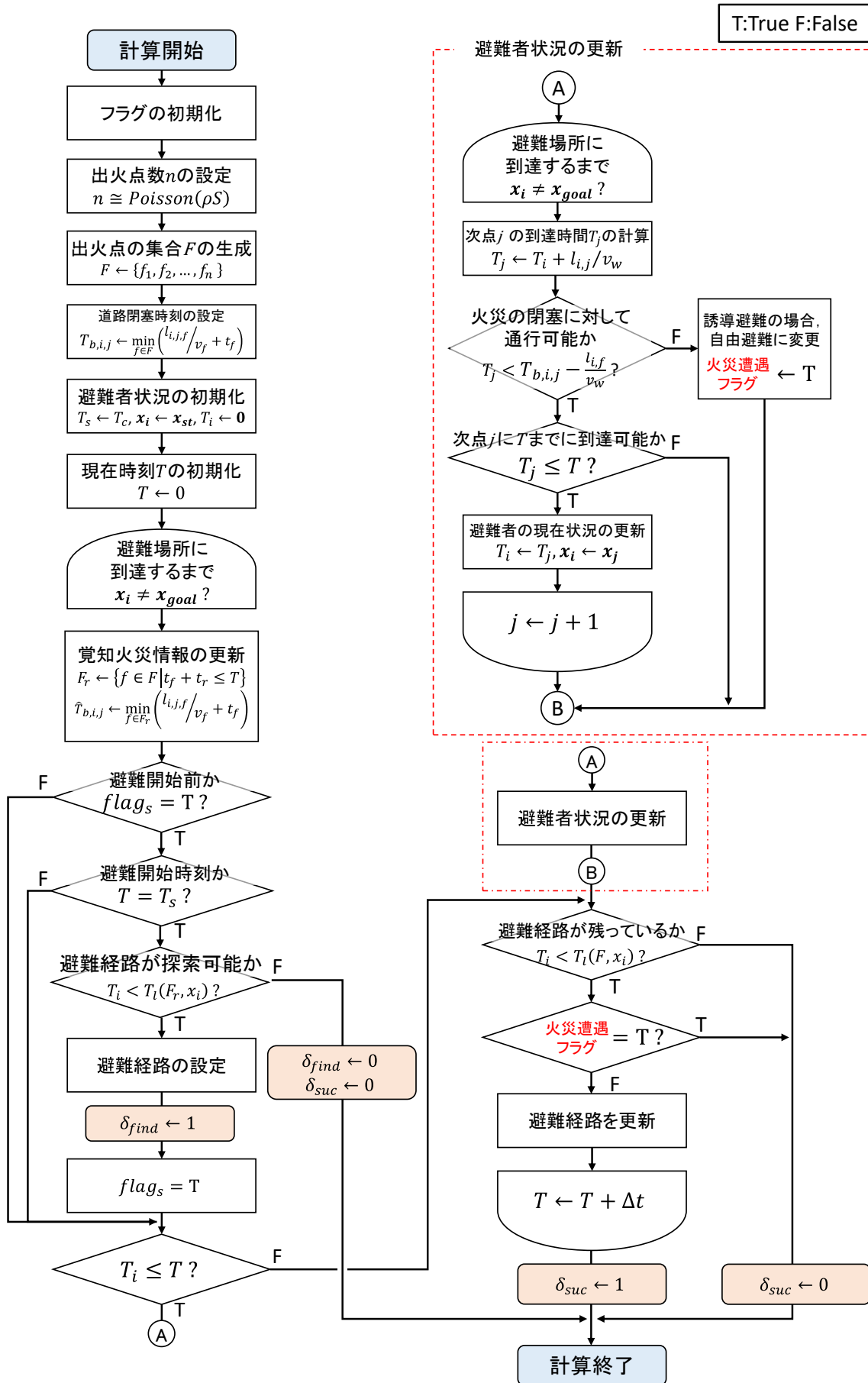


図 3-3 避難誘導シミュレーションの流れ

3.3 モンテカルロ法による避難誘導効果の評価指標

地震火災時の避難誘導による火災遭遇リスクは、出火点及びその覚知状況の配置(以下「出火パターン」)の不確実性の影響が大きい。したがって、避難誘導の効果を評価するには、十分なパターンの出火点配置に対する火災遭遇有無の結果を検証し、その平均的な像を評価する必要がある。そこで、本研究では 3.2 節で紹介したシミュレーションを繰り返して実施し、モンテカルロ法による頻度確率的な避難誘導効果の評価を行う。本節では、モンテカルロ法による避難誘導効果の評価指標を示す。

3.3.1 避難開始時における経路情報の評価

まず、避難開始時に避難経路が発見できた経路の特徴を評価するために、避難経路情報の評価を行う。避難経路情報は、避難開始時における均避難可能確率及び避難余裕性の x パーセンタイル値の 2 指標で評価する。

a) 平均値による避難可能確率の評価

避難可能確率は、避難経路が発見された試行における避難可能確率の平均値として、(48)で評価する。

$$\text{平均避難可能確率} := \frac{\sum_{i=1}^N P_{s,i} \delta_{find,i}}{\sum_{i=1}^N \delta_{find,i}} \quad (48)$$

$P_{s,i}$: i 番目の試行における避難可能確率

N : 試行回数

下添え字の i : 試行番号

$\delta_{find,i}$: i 番目の試行において避難開始時に避難経路を発見すれば 1, 発見しなければ 0

b) 分位数による避難余裕性の評価

本研究では、地震火災モデルの延焼速度と覚知モデルの延焼速度には差がなく、延焼予測のばらつきによる覚知火災の延焼拡大範囲への遭遇判定は行えない。そこで、避難開始時における避難余裕性のパーセンタイル値で評価することで、どの程度の延焼予測のばらつきが存在しても適用できる結果なのかを検証する。得られた試行のうち、($\delta_{find} = 1$)のサンプルを昇順にソートしたデータについて、(49)で評価する。

$$\text{避難余裕性の } x \text{ パーセンタイル値} := \begin{cases} M_{s,k} & k \in \mathbb{N} \\ \frac{M_{s,[k]} + M_{s,[k]}}{2} & k \notin \mathbb{N} \end{cases} \quad (49)$$

$$k = \frac{x}{100} * \sum_{i=1}^N \delta_{find,i}$$

$[k]$: k を越えない最大の整数

$[k]$: k を越える最小の整数

$M_{s,k}$: ($\delta_{find} = 1$) のサンプルを昇順にソートしたときの k 番目の値

3.3.2 火災遭遇率

本章において、避難誘導の効果を評価するために、(50)の火災遭遇率を評価する。

$$\text{火災遭遇率} := \frac{\sum_{i=1}^N (1 - \delta_{suc,i}) * \delta_{find,i}}{\sum_{i=1}^N \delta_{find,i}} \quad (50)$$

$\delta_{find,i}$: i 番目の試行において避難開始時に避難経路を発見すれば1, 発見しなければ0

$\delta_{suc,i}$: i 番目の試行において避難場所に到達すれば1, 到達しなければ0

(50)は、避難経路が発見できたサンプルに限定している。本章では、その時刻に避難誘導を実施できるのかという議論は、第5章以降で議論し、本章における避難リスクについては火災遭遇率で評価し、火災遭遇率の低減効果によって、避難誘導による頑健性を評価する。

注意すべきは、以上の避難経路評価及び火災遭遇率は、避難圏域全体に対する評価ではなく、1つの避難誘導規範に従う避難者の特性について評価したものである。先行研究の多くでは(たとえば、[大佛, 沖 2012], [武松ら 2008], [加藤 2016]), 避難圏域に人口に相当する避難者を生成し、その避難者のうち何人、避難場所に到達するのか、避難者全体の評価することが多い。一方で、避難圏域において避難誘導の効果は地点によって異なると考えられ、全体的な評価では避難誘導効果を適切に評価できないと考えられる。そのため、ひとつの避難誘導規範に焦点を当てて、評価指標を定義した。

3.4 実験の概要

本節では、動的誘導経路の火災遭遇リスクの低減効果の評価するための実験について、実験の目的、対象とする格子状市街地のモデル及び実験条件を示す。

3.4.1 実験の目的

第2章で構築したリアルタイム動的誘導経路による火災遭遇リスクの低減効果を検証するために、避難可能最短経路及び動的更新ありの最短経路について、火災リスクが均質な格子状市街地を対象として各種パラメータを変化させたシミュレーション実験を行い、非火災遭遇率(1 - 火災遭遇率)の推移を観察する。

火災リスクが均質な市街地を想定し、第2章で避難可能確率を構築した時の市街地条件と同様であり、避難可能確率の妥当性評価も含まれている。また、現実の市街地では、道路ネットワークの粗密や火災リスクの不均質、大規模な不燃領域の存在等、市街地の特性が大きく組み込まれており効果検証をする上でケーススタディの枠を出ない。そこで、市街地上に地震火災の延焼拡大状況及び覚知情報以外の性質の偏りが少ない、換言すると、覚知情報と避難場所の位置以外の情報が少ない状況を想定することで、動的更新による純粋な効果を検証することを目的としている。

3.4.2 避難圏域の市街地モデル - 格子状市街地 -

図3-4に格子状市街地のモデル構造を示す。本市街地は、5300m×5300mの広域な矩形型の通行不能領域(出火・延焼が生じる領域)内に、100mグリッドの道路ネットワーク(道路リンク・ノード)が広がっている。通行不能領域右(東)側一面には、避難場所となる安全な領域が存在する。実市街地モデルと同一のプログラムを使用するという理由から、避難場所の入り口と通行不能領域の間には僅かな延焼が生じず避難場所と連結している領域(安全領域)を設けている。通行不能領域上の任意の点から避難場所の入り口となるノードが存在し、避難者は本ノードを目指し避難を実施する。本研究では、避難者を図中のように、通行不能領域の上下(南北)中央に領域東側から1000m間隔で避難開始地点を設定している。

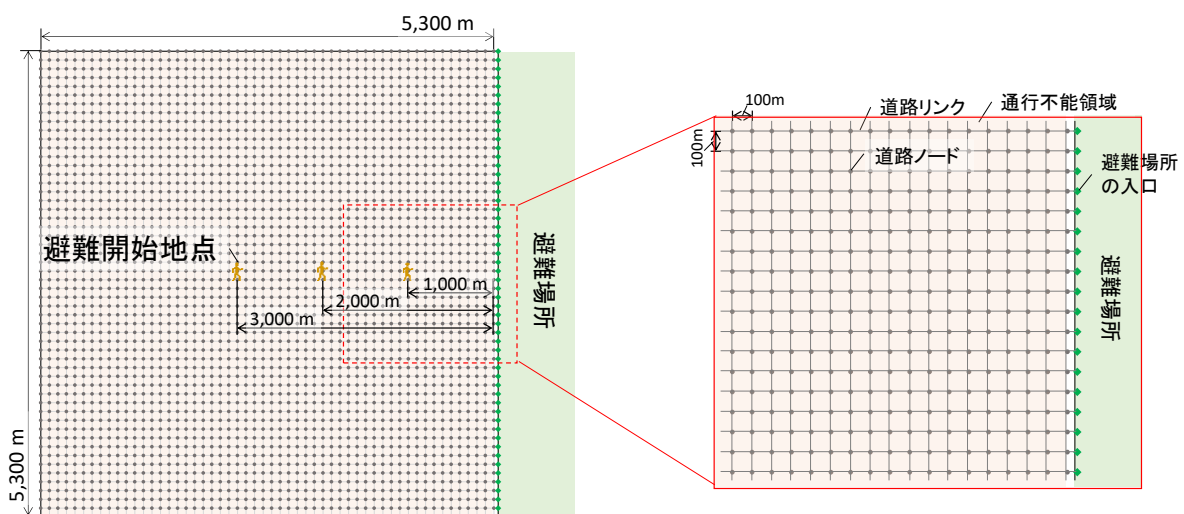


図 3-4 格子状市街地

3.4.3 実験条件

表 3-4 実験パラメータにモデル別の実験パラメータを示す。避難圏域は 3.4.2 で示した格子状市街地とし、3000m 地点から P 最大経路若しくは P 最大経路に動的更新を加えた避難誘導に従って避難するシミュレーションを実施する。

地震火災シミュレーションでは、出火点を阪神淡路大震災の平均的な出火件数密度である 3.0×10^{-6} [件/m²]と初期消火等によって出火が抑えられた時を想定した 1.5×10^{-6} [件/m²]、延焼速度は阪神淡路大震災で多く見られた 60 [m/h]程度を中心として、代表的な延焼予測モデルである東消式 2001([東京消防庁 2001])で算出される最大規模の速度である 100 [m/h]と不燃化が進んだと想定される 30 [m/h]を設定する。

覚知情報シミュレーションでは、覚知確率は、阪神淡路大震災の覚知率に基づいた値と近年の情報収集能力の向上を見越した値を設定する。阪神淡路大震災のデータに基づく場合、集計方法によって覚知率は大きく変動するが、[藤井, 糸井川 2005]の集計に基づいて 119 番通報および駆けつけ通報に限定した場合の 0.5, 消防機関が直接火災を発見する自己覚知を含む場合の 0.7 とした。また、近年の情報収集能力の向上を見越した 0.9, 覚知までのタイムラグを除いて殆ど完全情報とみなせる 1.0 を設定した。更新間隔は、0.1 [h]と固定とし、6 分に 1 回更新するという高頻度な更新時間を設定した。

以上の地震火災及び覚知情報に対して、歩行速度を平常時の健常者歩行速度である 4000 [m/h], 高齢者の避難や災害時の負傷状況等を想定した 2000[m/h]に設定した避難者を 1 人ずつ出発させ、0.5[h]間隔で 4 時間後までの避難を検証した。

試行回数は、平均像を評価する上で十分に収束する回数として、10000 回シミュレーションを実施した。

以上の実験において、避難者別に非火災遭遇率(「1 - 火災遭遇率」)を評価し、以上の条件別に避難開始時刻に対する推移を観察する。なお、火災遭遇率ではなく、その背反の非火災遭遇率を評価する理由は、避難可能確率との比較を行うためである。

表 3-4 実験パラメータ

モデル	パラメータ	値
市街地モデル	対象圏域	格子状市街地(図 3-4)
	x_s	3000 m 地点
	風速	—
地震火災シミュレーション	ρ	$1.5 \times 10^{-6}, 3.0 \times 10^{-6}$ [件/m ²]
	v_f	30, 60, 100 [m/h]
覚知情報シミュレーション	r	0.5, 0.7, 0.9 1.0
	Δt	0.1 [h]
避難行動シミュレーション	v_w	2000, 4000 [m/h]
	T_s	0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 [h]

3.5 格子状市街地における動的誘導経路の効果検証

本節では、3.4節で示した実験について、避難可能確率と火災遭遇リスクの関係、動的更新による火災遭遇リスクの低減効果に着目して結果の観察・考察を行う。

3.5.1 避難開始時刻に対する避難可能確率の推移

まず、避難可能確率と火災遭遇率の関係について結果を示す。図 3-5 に動的更新を行わないケースについて、歩行速度別・覚知確率別に避難開始時刻に対する非火災遭遇率(「1 - 火災遭遇率」)の推移をグラフ化し、地震火災別(延焼速度・期待出火件数密度)に並べた。各グラフの理論値は、避難開始時におけるP最大経路の経路長に対して、避難可能確率(2.3.2-(10)を参照)を計算し、その間を経路長に関する線形補間で埋めたものである。

a) 避難可能確率と非火災遭遇率の関係

まず、非火災遭遇率のプロット(実測値)が避難可能確率(理論値)のほぼ線上に存在し、避難可能確率と非火災遭遇率が非常によく一致していることがわかる。避難可能確率が非火災遭遇率そのものであるため当然の結果であるが、2.3.2-(10)では直線経路を想定しているのに対して、格子状の道路ネットワークを右左折して計算された経路でもある程度適用していることで非常に重要な事実である。このことから、少なくとも格子状市街地では、本研究の避難可能確率によって火災遭遇リスクに対する頑健性を評価することが妥当であることが示唆される。

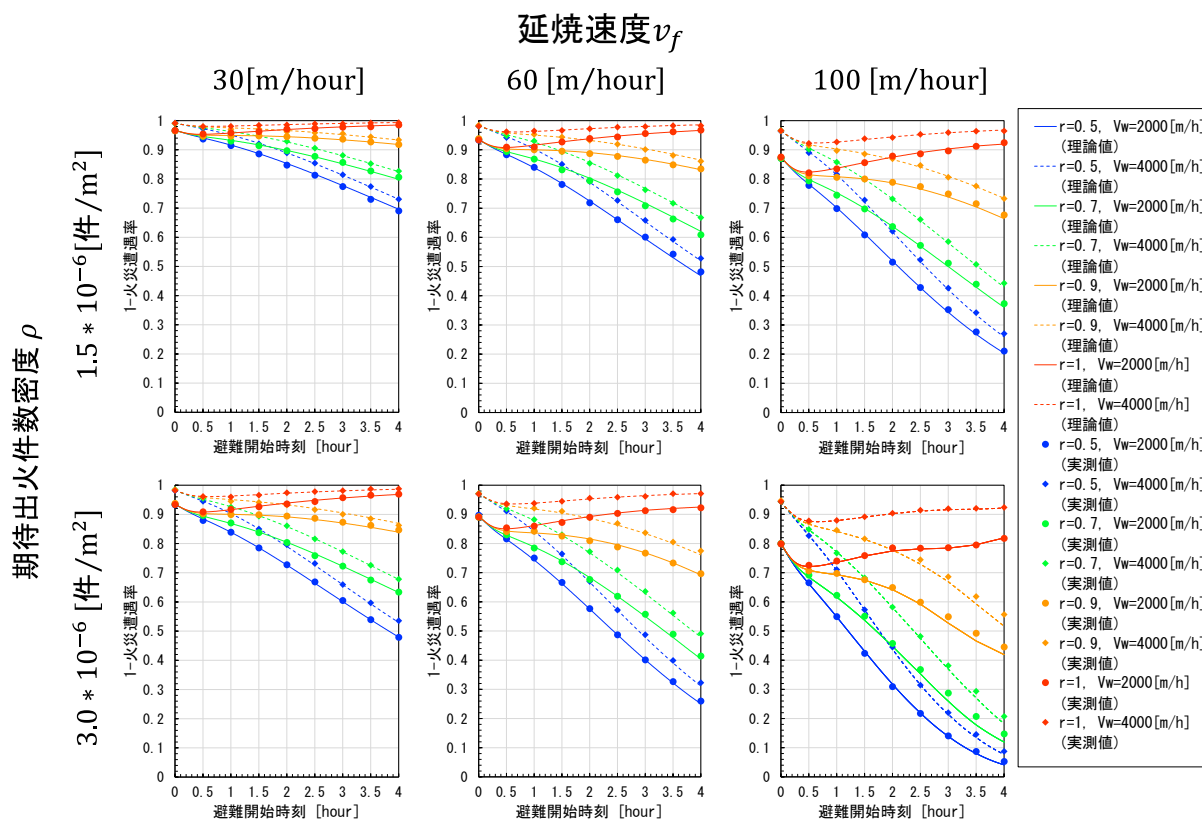


図 3-5 避難可能確率と火災遭遇率の関係

b) 地震火災の影響

次に、地震火災のパラメータとの関係に着目すると、期待出火件数が高いほど・延焼速度が速いほど、避難開始時刻の遅れに対して非火災遭遇率(「1-火災遭遇率」)の低下傾向が著しくなることがわかる。市街地上の火災によって被覆された面積は時間経過によって指数的に上昇し、やがて終息するS字カーブを描くことが知られている([栗田 2007])。そのため、避難開始時刻が早期であるなら期待出火件数密度や延焼速度の影響は小さく、比較的火災に遭遇せずに避難場所に到達できると考えられる。一方、出火件数が多い・延焼速度が速いほど、火災に覆われるスピードも増大するため、避難開始時刻の遅れに対する火災遭遇率が増大の加減も大きくなると思われる。

また、影響を及ぼす程度は、期待出火件数密度を2倍にする場合と延焼速度を2倍にする場合で非常に似ている。このことから、それぞれ同様に避難に影響を与えることが示唆され、平常時の不燃化整備や初期消火活動が等しく重要であることが言える。

c) 歩行速度の影響

歩行速度が遅いほど、非火災遭遇率は一律に低下していることがわかる。歩行速度が遅いことで、通行不能領域上に避難者が存在する時間が長くなるため、その間に火災が進展し、火災への遭遇に至ると考えられる。

d) 覚知確率による影響

覚知確率が高いほど、避難開始時刻の遅れに対して非火災遭遇率の低下が緩やかになる傾向がわかる。特に、「覚知確率=1.0」かつ「避難開始時刻=1時間前後」において火災遭遇率の低下が生じたり、避難開始の遅れに対して上向く分岐点が存在することがわかる。避難可能確率は、残存する未覚知火災への遭遇しない可能性を評価している。したがって、覚知確率が高いほど、時間経過後の避難経路周辺における未覚知火災の存在可能性は低くなり、信頼性の高い経路が得られていることが示唆される。

しかし、覚知情報による避難経路を提示することにも限界が見られる。地震火災のリスクが高いケースになるほど、避難開始の遅れに対して非火災遭遇率が上向く程度が緩やかになることがわかる。地震発生直後は、「覚知確率=1.0」であっても情報収集にはタイムラグ(覚知所要時間)があるため、避難可能確率の低下が生じる。地震火災リスクが高い場合、避難可能確率が低い所から上向き始めることに加え、避難開始後に新たな火災が発生もしくは覚知所要時間によって覚知が遅れている火災に遭遇するリスクが残存している。したがって、地震火災リスクが高い場合、避難開始時における避難経路の伝達のみでは、避難誘導の信頼性には限界が存在すると言える。

以上より、火災情報をいかに収集するか(「=覚知確率を高めるか」)が避難誘導において非常に重要であると言える。本実験では火災に遭遇した段階で計算を終了しているため、必ずしも、避難場所への到達可能性を表しているとは言えない。しかしながら、避難誘導先の経路が火災に遭遇しにくいことは、リアルタイムにおける避難誘導に信頼性に非常に大きく関わり意義があると考えられる。

3.5.2 動的更新による火災遭遇リスクの低減効果

次に、動的更新による火災遭遇リスクの低減効果について結果を示す。図 3-6 動的更新を伴うケースについて、歩行速度別・覚知確率別に避難開始時刻に対する非火災遭遇率（「1-火災遭遇率」）の推移をグラフ化し、地震火災別(延焼速度・期待出火件数密度)に並べた。各グラフの理論値は、前項同様、避難開始時の避難可能確率である。

全体として、動的更新による非火災遭遇率の向上が確認できる。特に、「覚知確率=1.0」のケースでは、非火災遭遇率は 1.0 に近い水準であり、完全情報下のように避難者を火災に遭遇させない誘導が可能であることが示唆される。一方、「覚知確率 ≤ 0.9 」のケースでは、非火災遭遇率の増加は見られるものの、覚知確率が低くなるほどその程度は低くなるだけでなく、避難開始時刻の遅れに対する低下傾向は、依然残っている。動的更新によって非火災遭遇率が増加するという事は、”避難開始時の経路では遭遇するはずの火災について、避難者の遭遇前に覚知し、迂回路を提示できること”を意味する。したがって、覚知確率が低いほど、こうした火災を覚知できる可能性が低下するため、より信頼性の高い更新先の迂回路が得られないことが示唆される。

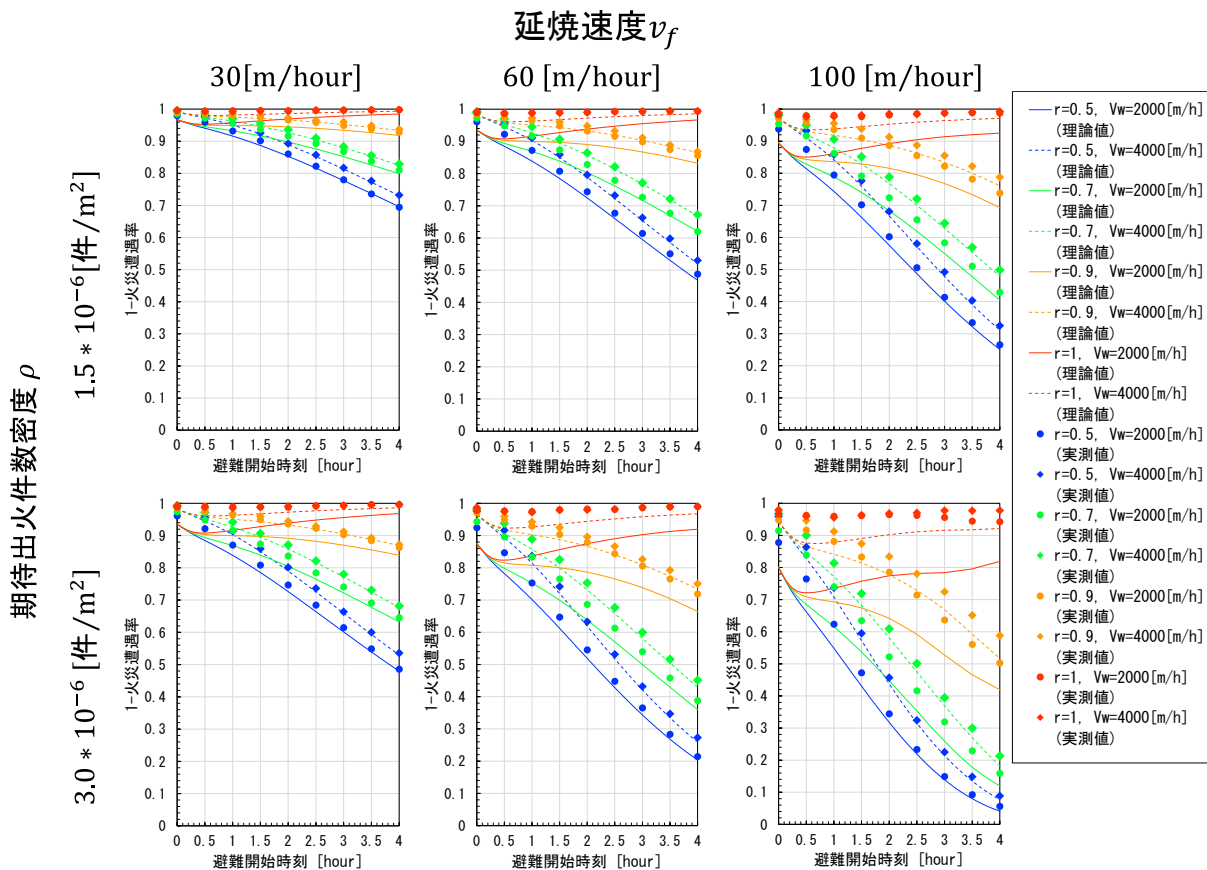


図 3-6 動的更新による火災遭遇率の低減効果

3.5.4 検証結果のまとめ

以下に、動的誘導経路による火災遭遇リスクの低減効果に関する検証結果を整理する。

a) 避難可能確率と火災遭遇率の関係

避難開始後の動的更新を行わずに避難開始時の経路のみに従う場合、避難可能確率が非火災遭遇率(「1 - 火災遭遇率」)に一致することを示した。このことから、避難可能確率を頼りに火災遭遇リスクを評価することの妥当性が示唆された。

地震火災リスク(期待出火件数密度・延焼速度)が高いほど、また、歩行速度が遅いほど、火災遭遇リスクが増大することが確認された。全体の傾向として、避難開始の遅れに伴う火災遭遇リスクの増大が見られ、地震火災リスクが高いほど避難開始時刻の遅れに伴うリスクの増大傾向が顕著になることが確認された。歩行速度が低下することで、市街地への滞在時間が長くなることで、全体的に火災遭遇リスクが増大することが確認された。

覚知確率が高いほど、火災遭遇リスクが低減されることが確認された。覚知確率の向上に従って、避難開始時刻の遅れに伴い火災遭遇リスクの増大傾向が緩やかになり、特に、「覚知確率=1.0」の場合には、「避難開始時刻=1.0 [h]」あたりを境に、避難開始時刻の遅れによって火災遭遇リスクの減少が確認された。これは、市街地上の火災情報が十分に収集されたことを意味している。一方、地震火災リスクが高いほど火災遭遇リスクが減少しにくくなり、十分経過した時点の避難開始においても一定の火災遭遇リスクが残存することが示唆される。

b) 動的更新による火災遭遇リスクの低減効果

避難途上にて避難経路を動的更新することで、火災遭遇リスクの低減効果が確認できた。「覚知確率=1.0」の場合、火災遭遇リスクは殆ど抑えられ、完全情報のように振る舞うことが可能であることが示唆された。一方、「覚知確率 \leq 0.9」では、避難開始の遅れに従い火災遭遇リスクの低減効果は小さくなることが確認された。これは、市街地上に残る未覚知火災が焼拡大することで、避難開始時の経路上で遭遇してしまう火災について、未然に迂回することが困難になっていく過程を示しており、動的誘導経路の限界であると言える。

c) 動的誘導経路の限界

以上より、覚知情報に基づく動的誘導経路による火災遭遇リスクの低減効果を示すことができた。一方、その限界についても明らかになった。「覚知確率=1.0」ではない限り、いずれかの避難者を未覚知火災が存在する経路へ誘導してしまうリスクは残ってしまい、現実にはこうした状況が多いと考えられる。したがって、不完全情報下の避難誘導には、火災への遭遇リスクが必ず残存することを理解し、避難誘導体制を検討する必要がある。

そして、もう一つ注意することがある。本章の分析では、各避難開始時刻に避難経路が残存している場合に対して行った評価である。したがって、その時刻に得られた避難経路による避難誘導の信頼性を検証したに過ぎず、適切な避難開始時刻については追加の検証が必要である。

3.6 小括

本章では、動的誘導経路の火災遭遇リスクの低減効果を検証することを目的として、地震火災、覚知情報及び避難誘導に従う避難行動を再現し、火災への遭遇可否を判定するリアルタイム避難誘導シミュレーションを開発し、火災リスクが一樣な格子状市街地を対象として、モンテカルロ法による検証実験を行った。

まず、リアルタイム避難誘導シミュレーションの開発では、第2章で仮定した単純な地震火災を市街地上に発生させ、[藤井, 糸井川 2005]のモデルに基づき覚知する状況を再現することで、不確実な地震火災および覚知状況をコンピュータ上で表現するモデルを構築した。その後、避難誘導情報に忠実に従う品行方正な避難行動モデルで避難者を表現し、火災へ遭遇するまで地震火災・覚知情報の更新・避難行動を継続するシミュレーションモデルを構築した。

その後、確率的な事象である本モデルの効果について、異なる出火・覚知パターンの試行を繰り返し替えし実行しその確率分布を得るモンテカルロ法による検証を行うために、頻度確率的な評価指標を構築した。避難開始時の経路情報の評価として、避難可能確率および避難余裕性の平均像を表す指標として、平均値による避難可能確率の評価及び分位数による避難余裕性の評価について定義した。また、避難誘導の火災遭遇リスクを表す指標として、火災遭遇率なる指標を構築した。これらの指標は、ひとつの避難誘導規範に関する効果を検証するものであり、避難者個人の特性を評価している。また、集計対象を避難開始時刻に避難経路が発見されたサンプルに限定し、避難誘導が実行された場合のリスクとして評価指標を構築した。

次に、火災リスクが一樣な格子状市街地を対象として、P最大経路(均質な市街地のため最短経路に一致)の動的誘導経路による火災遭遇リスクの低減効果に関する検証実験を行った。均質な市街地を想定することで、覚知情報による避難誘導情報のみの効果を得ることを目的とした。結果、その時刻に避難経路が残っている場合、動的誘導経路に従うことで、火災遭遇リスクが低減することを確認した。しかしながら、覚知確率が低いほど、その効果は限定的なものとなるため、覚知確率を高い水準にする施策の重要性が示唆された。

本研究は格子状市街地に限定した結果である。火災リスクや道路ネットワークが不均質な市街地について、また、避難経路の違いについては、次章にて大井競馬場・しながわ区民公園一带の避難圏域を対象として、ケーススタディによる検証・考察を行う。

第4章

大井競馬場・しながわ区民公園一帯を対象とした
動的誘導経路のケーススタディ

第4章 大井競馬場・しながわ区民公園一帯を対象とした動的誘導経路のケーススタディ

4.1 本章の目的と構成

本章では、第3章で実施したシミュレーションについて、大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域を対象としたケーススタディを行う。第3章と大きく異なる点は、実際の建物分布及び道路ネットワークに基づいてシミュレーションを行うため、火災リスク及び道路の粗密が不均質な領域における避難誘導を評価する点である。火災リスクが不均質な領域であるため、最短経路とP最大経路は一致するとは限らず、それぞれの避難経路の違いについても注目すべき点である。更に、第3章では扱わなかった、避難余裕性についても避難開始時に関して評価を行い、避難開始時刻に対する推移を評価する。

本章の構成は以下の通りである。

まず4.2節において、本研究の枠組みでシミュレーションを実施できるために、市街地データのモデル化を行う。特に、延焼クラスタより生成する通行不能領域によって、延焼拡大する範囲が分割される点が特徴的である。

4.3節では、大井競馬場・しながわ公園一帯の避難圏域の複数の町丁目を対象として避難シミュレーション実験を行う。動的更新を行わない場合について、避難可能確率と非火災遭遇率(「1 - 火災遭遇率」)の比較検証を行い、避難開始時の避難経路の特徴に関して、GIS上に可視化した視覚的特徴とモンテカルロ法による評価を行う。

最後に、4.4節において、火災遭遇率(3.3節)に基づき、動的誘導経路モデルによる火災遭遇リスクの低減効果について避難経路別に評価・検証を行う。

4.2 避難圏域の実市街地モデル —大井競馬場・しながわ区民公園一帯—

はじめに、実際の市街地データに基づきリアルタイム避難誘導シミュレーションを実施する市街地モデル(以下「実市街地」)の構築について説明する。本研究で想定する実市街地は、「領域」「リンク」「ノード」の3つの要素による避難ネットワーク、出火点の候補地点となる建物によって構成される。

図4-1に避難ネットワークの模式図を示す。まず、市街地の領域は、「通行不能領域」「安全領域」「避難場所」ので定義する。通行不能領域は、出火・延焼が生じる領域である。延焼クラスタ([加藤ら 2006])や避難不能クラスタ([洪水, 糸井川 2016])のように、火災の輻射熱が避難者へ影響を及ぼす範囲で設定される。「安全領域」は、通行不能領域の外側であり、出火・延焼が生じず、いつまでも留まり続けられる領域である。ただし、避難場所とは異なり、安全設計に基づき設定された領域ではないため避難場所への避難が必要な領域である。「避難場所」は避難の目標地点であり、輻射熱の計算によって得られた出火・延焼が生じない安全な領域である。

次に、道路ネットワークについて、交差点を表す「ノード」と道路を表す「リンク」で定義する。ノードおよびリンクは前述の3つの領域上に位置する。リンクは通行不能領域内外それぞれに存在し、1つのノードによって2つのリンク同士が接続される。ノードは、通行不能領域内外及び境界点のノード、避難場所と接する「避難場所ノード」が存在する。避難場所ノードから通行不能領域の境界に接するまでリンクを辿ると、その過程で通過したノード及びリンクは、いつまでも避難可能であることがわかる。これらのノード及びリンクを「避難可能確定ノード」「避難可能確定リンク」と呼ぶ。また、その境界点は、その通行不能領域上で発生した火災延焼がその地点に到達するまでに避難開始すれば避難可能なノードである。このノードを「安全境界ノード」と呼ぶ。

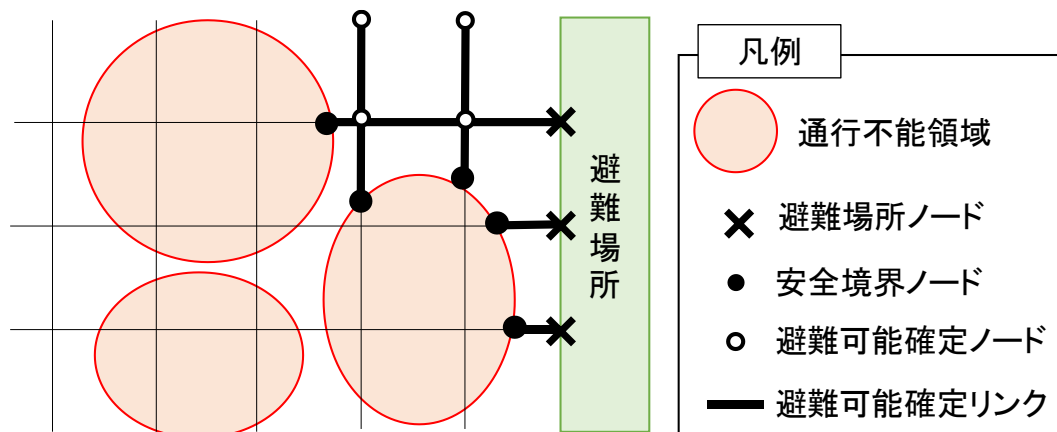


図4-1 避難ネットワークの模式図

本研究では、東京消防庁の東京都の市街地状況調査報告書(第9回)の地理情報データ([東京消防庁 2015])より、以下のデータを用いて、避難ネットワークおよび建物の出火候補点となる重心点を構築する。

- ・建物現況 (建物別に、4区分(耐火造・準耐火造・防火造・裸木造)の耐火性能が付与)
- ・道路ネットワーク(ノード, リンク)
- ・避難場所
- ・避難圏域

まず、避難圏域を3つの領域に分割する。本研究では、[渋谷, 糸井川 2016]に従い、任意の風速における延焼クラスタ及び避難不能クラスタを生成する。このうち、避難不能クラスタを通行不能領域とし、延焼クラスタ内で出火した建物は、通行不能領域の境界まで延焼するものとする。

a) 延焼クラスタ

延焼クラスタとは、建物間の類焼判定を確定的に行い、類焼すると判定された建物同士を一つの集合体(クラスタ)としてまとめた建物群である。その類焼判定では、各建物が火災時に発する輻射受熱量およびその距離減衰量から出火建物から延焼が及ぶ限界距離(以下「延焼限界距離」)を推定し、その延焼限界距離の範囲内に存在する建物同士が類焼するとしている。[加藤ら 2006]は、この延焼限界距離を建物構造および面積、風速より推定するモデルを提案しており、建物構造別に(51)で表される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{裸木造} : D_{\text{木造}} = a * \left(12 * \left(\frac{A}{10} \right)^{0.442} + D_{u, \text{木造}}(u) \right) \\ \text{防火造} : D_{\text{防火}} = a * \left(6 * \left(\frac{A}{10} \right)^{0.322} + D_{u, \text{防火}}(u) \right) \\ \text{準耐火造} : D_{\text{準耐火}} = a * \left(3 * \left(\frac{A}{10} \right)^{0.181} + D_{u, \text{準耐火}}(u) \right) \\ \text{耐火造} : D_{\text{耐火}} = 0 \end{array} \right. \quad (51)$$

D_X : 構造 X における延焼限界距離 [m]

A : 建物を正方形と仮定したときの一辺長 [m]

$D_{u,X}(u)$: 構造 X における風速 u の場合の延焼限界距離の増分 [m]

a : 集団火災時による延焼拡大効果を表す係数 (=1.5)

本来であれば、各建物から延焼限界距離内の建物へ延焼ベクトルを考慮し、延焼の及ぶ建物をネットワーク解析的に求める必要がある。したがって、出火建物を指定するたびに延焼クラスタが異なる。しかし、1つの延焼クラスタとして視覚的に表すことで、直感的な解釈が容易となる。そこで、(51)で求めた延焼限界距離の1/2まで延焼が及ぶと考え、延焼限界距離で生成したバッファが重なる建物同士で同一の延焼クラスタとして設定する。延焼限界距離の1/2は、どちらか一方の建物の延焼限界距離内にあれば、双方間の延焼が及ぶものと考えていることを意味している。

b) 避難不能距離

[浜田 1975]によると，建物の類焼に必要な輻射受熱量は $4000\text{kcal/m}^2\text{h}$ とされており，延焼限界距離は，この輻射受熱量が到達する距離から求められる．一方，人間の許容輻射受熱量は， $2050\text{kcal/m}^2\text{h}$ とされており，約 $1/2$ の熱量で通行に支障をきたす．したがって， $2050\text{kcal/m}^2\text{h}$ の輻射受熱量が到達する距離を再計算する必要がある．[渋木，糸井川 2016]は，輻射受熱量の減衰量を考慮することによって，避難不能距離として，(30)のように求めている．

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{裸木造} : De_{\text{木造}} = a * \left(17 * \left(\frac{A}{10} \right)^{0.442} + D_{u, \text{木造}}(u) \right) \\ \text{防火造} : De_{\text{防火}} = a * \left(8 * \left(\frac{A}{10} \right)^{0.322} + D_{u, \text{木造}}(u) \right) \\ \text{準耐火造} : De_{\text{準耐火}} = a * \left(4 * \left(\frac{A}{10} \right)^{0.181} + D_{u, \text{準耐火}}(u) \right) \\ \text{耐火造} : D_{\text{防火}} = 0 \end{array} \right. \quad (52)$$

De_X : 構造 X における避難不能距離 [m]

A: 建物を正方形と仮定したときの一辺長 [m]

$D_{u,X}(u)$: 構造 X における風速 u の場合の延焼限界距離の増分 [m]

a: 集団火災時による延焼拡大効果を表す係数 (=1.5)

c) 通行不能領域の生成

図 4-2 に，延焼クラスタと通行不能領域の関係図を示す．まず，各非耐火建物より，延焼クラスタを生成する．延焼クラスタは，バッファによって視覚的に面的な広がりを示しているが，実際は，延焼が及ぶ建物同士を分類しているのみで，延焼のおよぶ領域 ($4000\text{kcal/m}^2\text{h}$ の輻射受熱量が到達する領域)や，避難に影響を及ぼす領域 ($2050\text{kcal/m}^2\text{h}$ の輻射受熱量が到達する領域)を表していない．そこで，延焼クラスタに所属する建物同士で，避難不能距離に基づきバッファを生成する．このようなバッファは，延焼クラスタ内の建物のいずれかが出火した場合，いつか避難に影響を及ぼす領域を意味しており，本領域を実市街地の通行不能領域とする．すなわち，通行不能領域は，延焼クラスタ単位で生成され，ある延焼クラスタの出火候補地点で発生した火災は，通行不能領域内にて，同心円状に延焼がおよぶ．道路リンクの青線部分は，延焼クラスタ A の出火候補地点で発生した火災によってのみ，延焼遮断が生じる．一方，道路リンクの赤線部分は，延焼クラスタ B の出火候補地点で発生した火災によってのみ，遮断される．そして，緑部分は，延焼クラスタ A，延焼クラスタ B，それぞれで発生した火災の延焼が及ぶ．

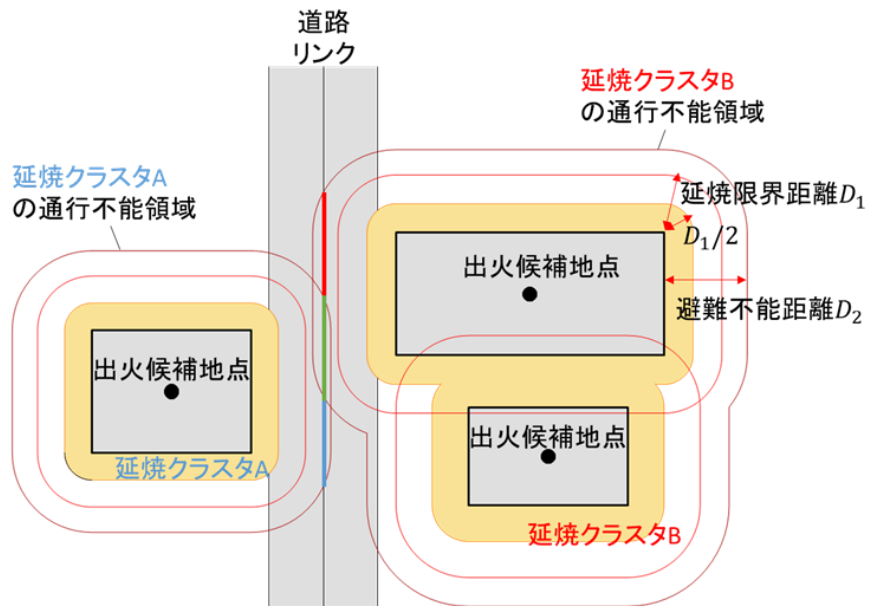


図 4-2 延焼クラスタと通行不能領域の関係図

図 4-3, 図 4-4 及び図 4-5 に, 実際の通行不能領域の生成例を示す. 図 4-3 に示すように, 耐火造ではない各建物(図 4-3, 緑色で塗りつぶされた建物)を選択する. これらの建物を用いて, 通行不能領域を生成する. まず, 図 4-4 のように, 非耐火造建物より延焼限界距離の 1/2 の距離を用いてバッファ(延焼バッファ)を生成する. この時, 交わる延焼バッファ同士を結合する. この結合した領域が延焼クラスタである. 出火後, この同じクラスタに属する建物間のみで延焼が生じる. 次に, 図 4-5 に示すように, 各建物から避難不能距離を用いてバッファ(避難不能バッファ)を生成する. 同じ延焼クラスタに属する建物から生成された避難不能バッファ同士を結合することで, 通行不能領域が生成される.



図 4-3 実市街地における通行不能領域の生成例：非耐火造建物の選択



図 4-4 実市街地における通行不能領域の生成例：延焼限界距離に基づく延焼クラスタ

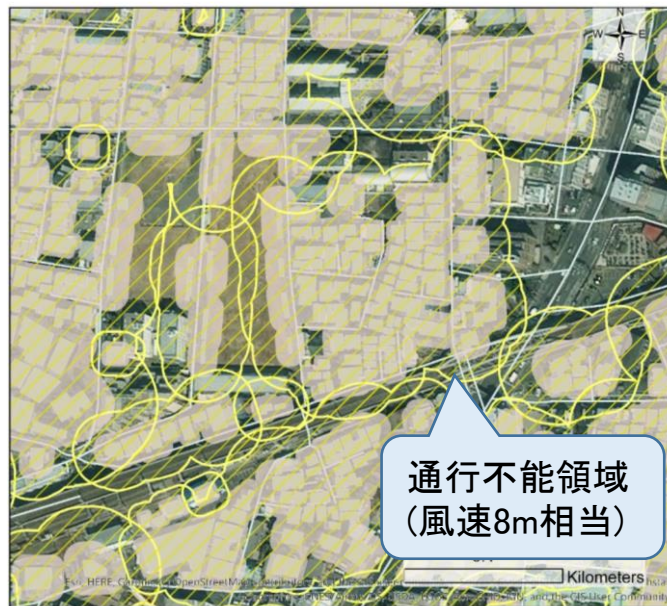


図 4-5 実市街地における通行不能領域の生成例：避難不能距離に基づく通行不能領域

4.2 避難圏域の実市街地モデル —大井競馬場・しながわ区民公園一帯—

図 4-6 は、以上の方法で生成した大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域における避難ネットワークと通行不能領域である。市街地を覆っている彩色されたポリゴンが通行不能領域である。また、代表として 5 か所の町丁目を表示している。大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域は、「中延四丁目」から「西大井一丁目」にかけて大きな通行不能領域が存在し、密集市街地が広がっている。一方、「東大井五丁目」や「南大井五丁目」周辺の避難場所目前は、不燃化が進んでおり、小規模な通行不能領域が疎らに分布している。このように、建物の粗密が異なることで大小さまざまな通行不能領域が存在する中、火災に遭遇しないように避難誘導が可能なのか検証が行われる。



風速は 8[m/h]で計算

図 4-6 大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域における通行不能領域

4.3 避難経路の特徴

本節では、避難開始時に探索された避難経路の特徴について、GIS に可視化した上での視覚的特徴、避難開始時の避難経路情報の評価に関して考察する。

4.3.1 実験の目的

不均質な実市街地において探索される避難経路が、どのような特徴を有しているかを明らかにするために、動的更新を伴わない複数の誘導経路規範について、視覚的特徴及び避難開始時の経路評価(避難可能確率・避難余裕性)について比較を行う。

4.3.2 実験条件

実験条件を表 4-1 に、対象地を図示したものを図 4-7 に示す。本実験では、大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域において、避難距離及び火災リスクの異なる、中延四丁目、西大井五丁目、西大井一丁目、東大井五丁目、南大井五丁目の重心最寄りのノードを対象として実施する。通行不能領域として風速 8[m/h]の延焼クラスタに対応する洪水・糸井川の避難不能クラスタを設定し、東京都の被害想定等を参考に、比較的深刻なケースに相当するように、期待出火件数密度を 3.0×10^{-6} [件/m²]、延焼速度を 100[m/h]に設定した。覚知確率の影響を評価するため、覚知確率 0.5, 0.7, 0.9, 1.0 それぞれの状況に対して、避難開始時間に対する平均避難可能確率及び避難余裕性の推移を比較した。

表 4-2 に示す避難経路規範について、経路発見回数が 1000 回になるまで試行を繰り返し、発見された 1000 回分の避難の結果を集計した。

表 4-1 実験条件

モデル	パラメータ	値
市街地モデル	対象圏域	大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域
	x_s	中延四丁目、西大井五丁目、西大井一丁目、東大井五丁目、南大井五丁目
	風速	8 [m/h]
地震火災	ρ	3.0×10^{-6} [件/m ²]
シミュレーション	v_f	100 [m/h]
覚知情報	r	0.5, 0.7, 0.9 1.0
シミュレーション	Δt	0.1[h]
避難行動	v_w	2000, 4000※ [m/h]
シミュレーション	T_s	0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 [h]

※避難可能確率の妥当性検証のみ

表 4-2 対象とする避難経路及び論文上での表記

避難経路	必要余裕性	論文上での表記
最短経路		最短, 最短経路
P 最大経路		P 最大, P 最大経路
最大余裕経路		M 最大, 最大余裕, 最大余裕経路
M*-P 最大経路	0.2	M*(0.2)-P 最大, M*(0.2)-P 最大経路
M*-P 最大経路	0.5	M*(0.5)-P 最大, M*(0.5)-P 最大経路
M*-P 最大経路	1.0	M*(1.0)-P 最大, M*(1.0)-P 最大経路



図 4-7 対象とする避難開始地点と避難場所

4.3.3 避難可能確率の妥当性検証

実市街地では、出火点が建物分布に依存するため、避難可能確率が適切に評価できていることを確認する必要がある。そこで、避難開始地点別に火災遭遇率と避難可能確率の比較を行った。第3章と同様に、避難可能確率は火災遭遇リスクに対する頑健性の指標であるため、非火災遭遇率(「1 - 火災遭遇率」と)との比較を行う。「避難属性」(避難開始地点別・歩行速度別・覚知確率別・避難経路別)毎に、発見された経路の避難可能確率と非火災遭遇率に関する散布図を作図し比較した。図4-8に避難開始地点別の平均避難可能確率と非火災遭遇率の関係を示す。各ポイントが避難属性毎の比較結果を表している。

「中延四丁目」「西大井四丁目」は非常に当てはまりがよい。一方、「西大井一丁目」は当てはまりが良い分布と非火災遭遇率の方が高くなる2傾向が確認できる。「南大井五丁目」「東大井五丁目」は、非火災遭遇率の方が高く、過大にリスク評価されていることがわかる。避難可能確率は、連続で無限な領域を仮定としてモデル化されている。「中延四丁目」「西大井四丁目」のように非耐火建物密度が高い地域では(図4-7を参照)、出火点の候補点(建物の重心)が密に分布しており、また、大きな通行不能領域上を通過する。そのため、出火点分布がランダムな分布に近くなり、避難可能確率で非火災遭遇率をよく表せると考えられる。一方、「西大井一丁目」における一部の避難属性、「東大井五丁目」「南大井五丁目」は非耐火建物密度が低い地域であり、比較的小さな通行不能領域が疎らに分布するため、通行不能領域の境界部分の影響を強く受け、通行不能領域よりも大きな出火警戒領域を想定してしまい、過大なリスク評価になっていると考えられる。

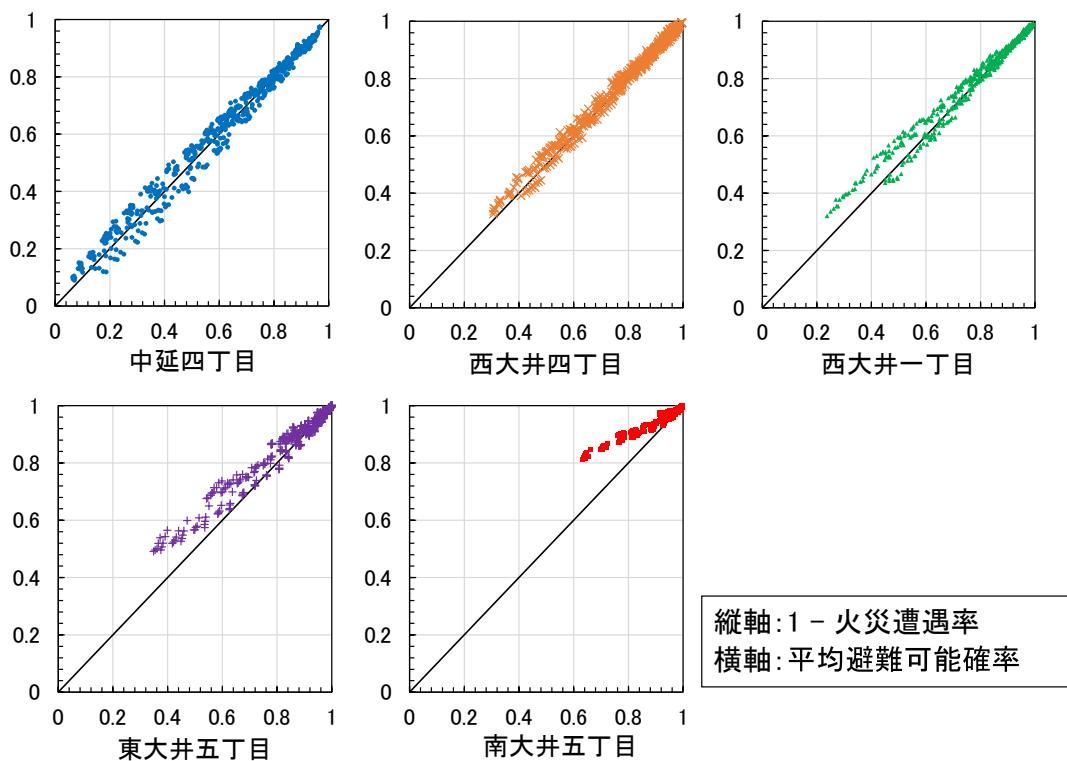


図4-8 平均避難可能確率と火災遭遇率の関係

4.3.4 避難経路の視覚的特徴の考察

リアルタイム避難シミュレーションにおける1ケースを空間情報システム上に可視化し、避難可能確率最大経路の特徴を観察する。図4-9に、「覚知確率=0.5, 歩行速度=2000[m/h]」のケースにおける、2時間後の覚知状況に対する避難経路を可視化し、表4-3に可視化ケースの避難開始地点別・避難経路別の避難可能確率・避難余裕性・経路長を示す。選択された避難経路はそれぞれ点線で表しており、その上の二重線が、各町丁目重心(図中人型印)から避難場所(図中旗印)まで、当該避難経路で移動した場合の避難の軌跡である。火災に遭遇する場合、避難場所に到達する前に二重線が途絶えている。



図4-9 2時間後の覚知状況における避難経路(覚知確率 r=0.5)

表4-3 避難開始地点別・避難経路別の避難可能確率, 避難余裕性, 経路長の比較

	避難可能確率				避難余裕性				経路長 [m]			
	①	②	③	④	①	②	③	④	①	②	③	④
中延四丁目	0.30	0.28	0.49	0.50	0.09	<i>Inf</i> ^{**}	0.21	1.02	3467	6367	5336	5560
西大井四丁目	0.61	0.72	0.75	0.74	2.63	3.81	0.19	1.54	2218	3039	3011	2976
西大井一丁目	0.68	0.72	0.78	0.78	1.79	1.79	1.65	1.65	1976	4254	3526	3526
東大井五丁目	0.65	0.93	0.93	0.93	0.08	1.01	1.01	1.01	1700	2197	2197	2197
南大井五丁目	0.88	0.95	0.95	0.95	0.04	0.04	0.04	0.04	653	1813	1813	1813

①: 最短経路 ②:最大余裕経路 ③: P 最大経路 ④M*(1.0)-P 最大経路

^{**}*inf*: 覚知火災によって経路が閉塞されず, 避難余裕性が無限となる場合

1 ケースのみでの可視化であるため、避難可能確率を最大化にした場合でも火災に遭遇したり、一方、最大余裕経路や最短経路でも避難場所に到達したりと、1 ケースの火災遭遇の可否は必ずしも避難リスクと一致しない。これが、避難経路の安全性を検証するためには、モンテカルロ法による検証が必要な理由である。一方、得られた避難経路と覚知火災や市街地の建物密集との関係を比較する上では、ある程度特徴が見られる。

a) 避難可能確率最大化による経路選択の特徴

まず、避難可能確率最大化による経路選択の特徴を観察する。「西大井四丁目」の P 最大経路及び M*(1.0)-P 最大経路に着目すると、非耐火建物密度が高い地域を避けるように避難経路が選択されていることがわかる。当然ながら、非耐火建物密度が低い地域を通過することで、高い避難可能確率が確保されるためである。一方、「中延四丁目」の P 最大経路に着目してみると、最短経路では、直近の非耐火建物密度が高い地域をいち早く抜け出している一方、P 最大経路はしばらくの間、高密度な地域を通過していることがわかる。しかし、P 最大経路では、その後、非常に低密度な地域(品川区役所方面)へ抜ける経路となっており、最短経路は高密度な地域を横断するような避難経路になっている。

「中延四丁目」の避難可能確率(表 4-3)に着目すると、P 最大経路は 0.50、最短経路は 0.30 というように約 0.20 もの差が生じている。道路リンクの始点に到達する時間で、出火警戒領域の大きさが決定するため、避難経路の後半の方が安全性に大きく寄与するためである。このように、避難可能確率を最大化するように経路選択することで、避難開始地点から直後の移動だけでなく、広域的に見て安全に移動するように経路選択がされている。

b) 必要余裕性の確保による経路選択の特徴

次に、必要余裕性の確保による経路選択の特徴を観察する。「中延四丁目」「西大井四丁目」「西大井一丁目」の最大余裕経路に着目すると、覚知火災に対する避難余裕性を確保するように、覚知火災を中心に非常に大きく迂回した経路が選択されている。一方、非常に大きな経路長(特に、「中延四丁目」)となってしまう。逆に、P 最大経路は、覚知火災の近くを通過することがあり、避難余裕性は 1.0 を大きく下回り余裕の無い経路となっている。このように、避難可能確率及び避難余裕性の最大化経路の間には、トレードオフが生じている。一報、M*(1.0)-P 最大経路はその両者を折衷した経路のように見られる。M*(1.0)-P 最大経路の避難可能確率は、P 最大経路と差はなく、避難余裕性が 1.0 に近い値が確保されている。

以上のように、今回のケースのように比較的早い避難開始時刻で火災延焼が進んでいない場合、避難経路の選択猶予があり、必要余裕性を考慮した避難可能確率最大経路において、不完全情報下の避難リスクに対して安全で望ましい経路が選択されていると言える。

c) 避難経路規範別の避難可能確率の比較

図 4-10 から

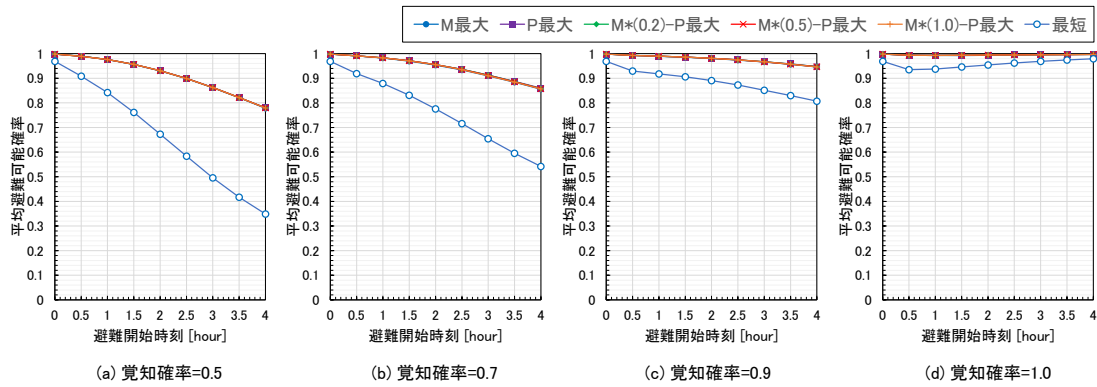


図 4-14 に、各避難開始地点について、避難経路別・覚知確率別の避難開始時刻に対する平均避難可能確率の推移を示す。

まず、避難開始時刻と平均避難可能確率の関係について考察する。いずれの避難開始地点、避難経路においても同様な結果が得られている。

図 4-10 に着目すると、避難開始時間が遅れるほど避難可能確率は低下するが、覚知確率が高いほどその傾向は緩やかになっている。特に「覚知確率=1.0」のケースでは、0.5 時間後から 1.0 時間後を境として増加する傾向がみられる。「覚知確率=1.0」のケースでは、時間が経過する度に、市街地上に存在する未覚知火災に対して覚知火災が増えるため、未覚知火災が存在するリスクが低下するためである。「覚知確率=0.9」のケースでは、上記の傾向が見られないことから、覚知火災の方が上回る状況が発生するためには、1.0 に近く非常に高い水準の覚知確率が求められる。以上の結果は、第 3 章の分析結果と同様であり、不均質な実市街地においても格子状市街地で確認された避難誘導効果が得られることが示唆される。

次に、避難経路別の比較を行う。「中延四丁目」「西大井四丁目」「西大井一丁目」において同様な避難経路間の違いが見られた。

図 4-10 に着目すると、P 最大経路では、最短経路及び最大余裕経路に対して高い避難可能確率が得られることがわかる。一方、最大余裕経路は、P 最大経路ほどではないが、最短経路よりも避難可能確率が高い。これは、覚知火災の発生個所には、火災のリスクが高い地域となりやすいためである。しかしながら、避難開始時刻が、2 時間以内のような比較的早い時期には、P 最大経路と比較して避難可能確率が低く、必要以上に大きく迂回した経路を選択していると言える。一方、両者を折衷した M*-P 最大経路は、必要余裕性を大きく取るほど、避難開始時刻が早期の段階では P 最大経路と一致し、避難開始時刻が遅れるほど最大余裕経路に漸近していくことがわかる。

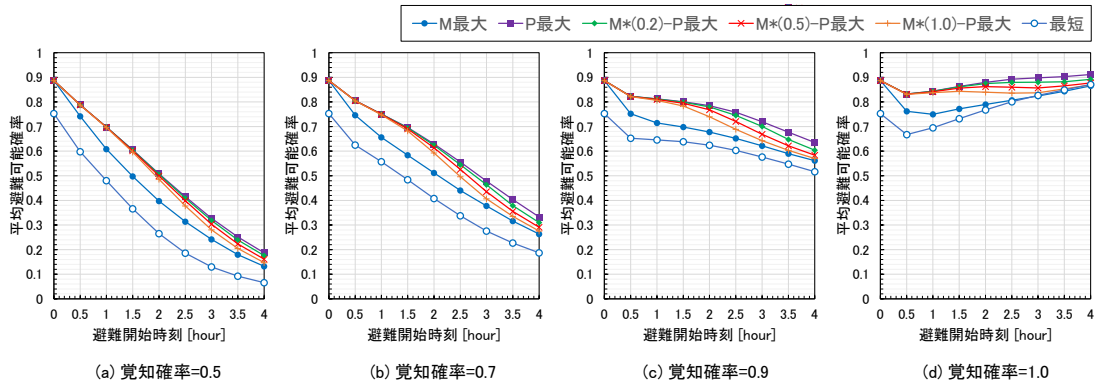


図 4-10 避難開始時刻に対する平均避難可能確率の推移(中延四丁目)

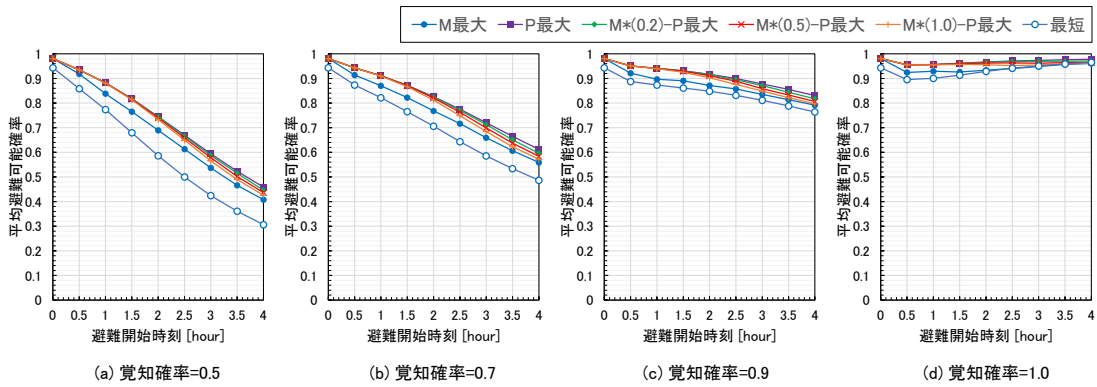


図 4-11 避難開始時刻に対する平均避難可能確率の推移(西大井四丁目)

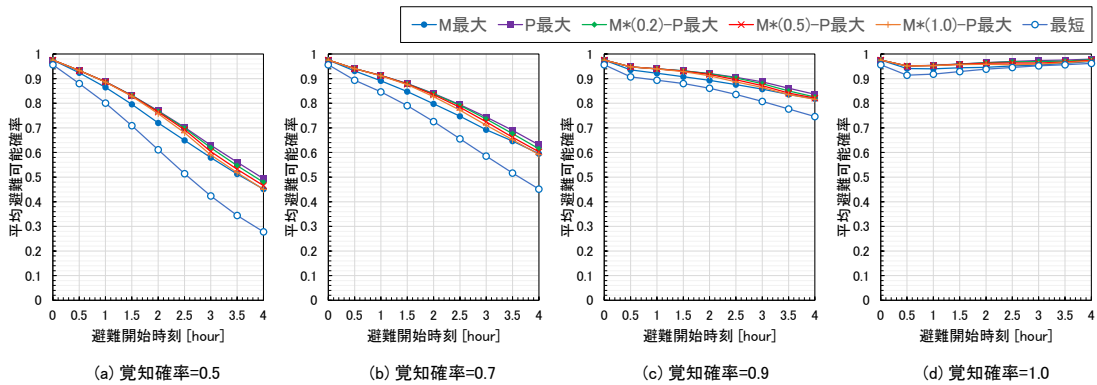


図 4-12 避難開始時刻に対する平均避難可能確率の推移(西大井一丁目)

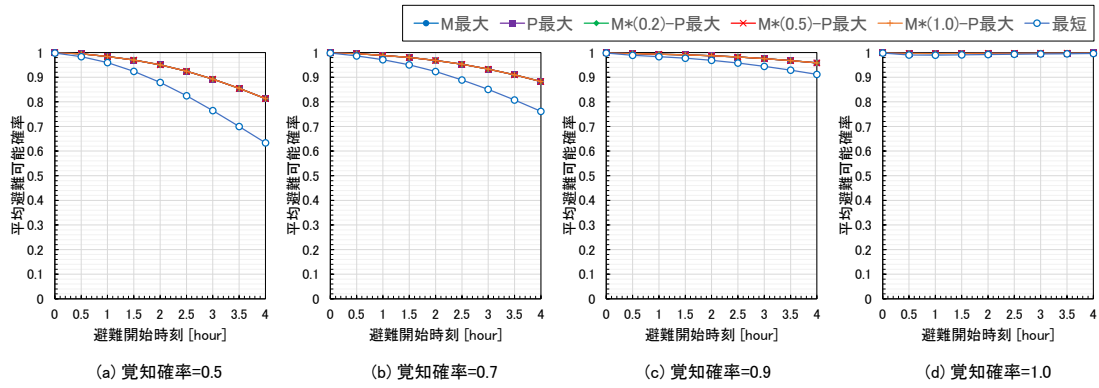


図 4-13 避難開始時刻に対する平均避難可能確率の推移 (東大井五丁目)

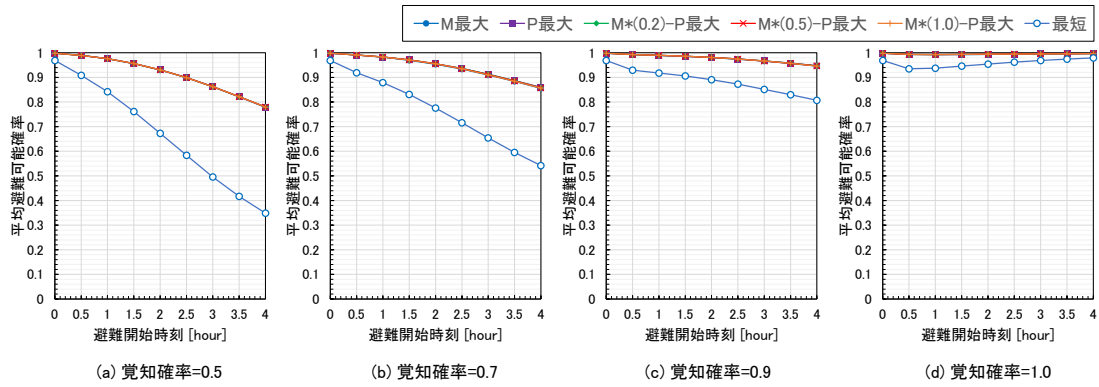


図 4-14 避難開始時刻に対する平均避難可能確率の推移 (南大井五丁目)

4.3.5 避難経路規範別の避難余裕性の比較

次に、避難経路規範別に避難余裕性の比較を行う。

図 4-15 から図 4-19 に、避難経路別・覚知確率別の避難開始時刻に対する避難余裕性の 50 パーセント値を示す。「中延四丁目」に着目すると、避難開始の遅れに従い避難余裕性の低下が見られる。特に、最短経路では、急激に低下しており、1 時間後には 1.0 を下回っており、余裕の無い避難となっている。覚知確率が高いほど、避難余裕性は小さいが、得られている経路がより危険になっているわけではなく、覚知確率が高いほど多くの火災を覚知しているため、より多くの火災に対して余裕を考慮していることを意味している。

経路間の比較をすると、最大余裕経路では、最短経路や P 最大経路と比較して、非常に大きな避難余裕性が確保できている。P 最大経路も最短経路と比較すれば避難余裕性が確保されており、避難余裕性と避難可能確率にはある程度の相関があることが示唆される。また、M*-P 最大経路の避難余裕性は、避難開始時刻が早い段階では、P 最大経路に近く、避難開始の遅れに従い P 最大経路の余裕が確保できていないのに対して、M*-P 最大経路は、必要余裕性に従い、最大余裕経路の避難余裕性に漸近する形で、避難余裕性を確保している。この傾向は、「西大井四丁目」「西大井一丁目」でも同様な傾向が確認できる。

一方、「東大井五丁目」「南大井五丁目」に着目すると、避難余裕性の 50 パーセント値は無限の値をとっており、平均的に、火災による道路閉塞の制約を受けない避難経路が選択されており、不燃化された領域の影響が見られる。

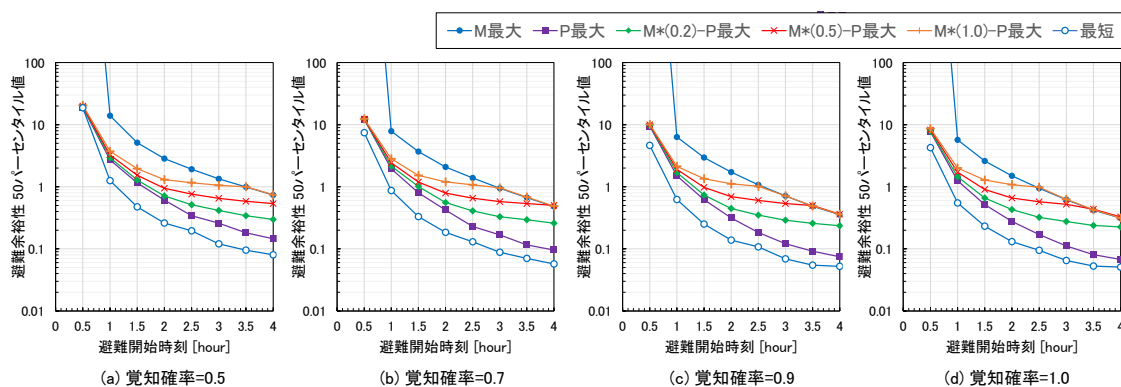


図 4-15 避難開始時刻に対する避難余裕性の推移(中延四丁目)

4.3 避難経路の特徴

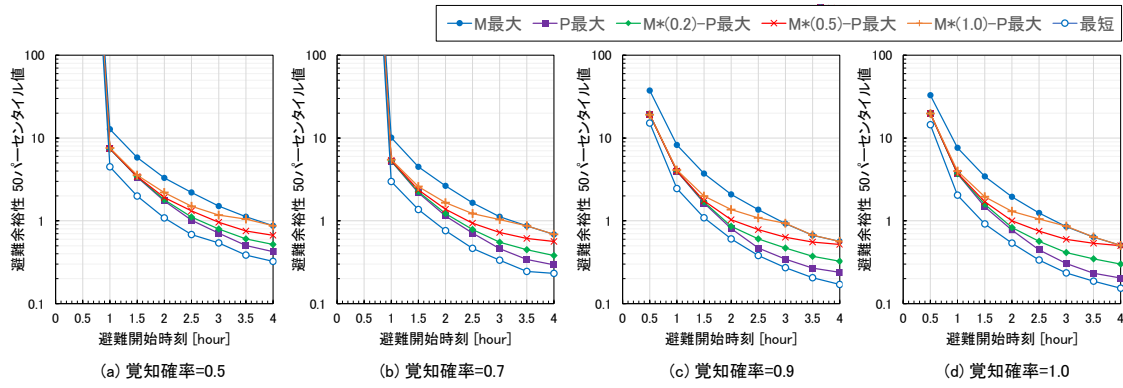


図 4-16 避難開始時刻に対する避難余裕性の推移 (西大井四丁目)

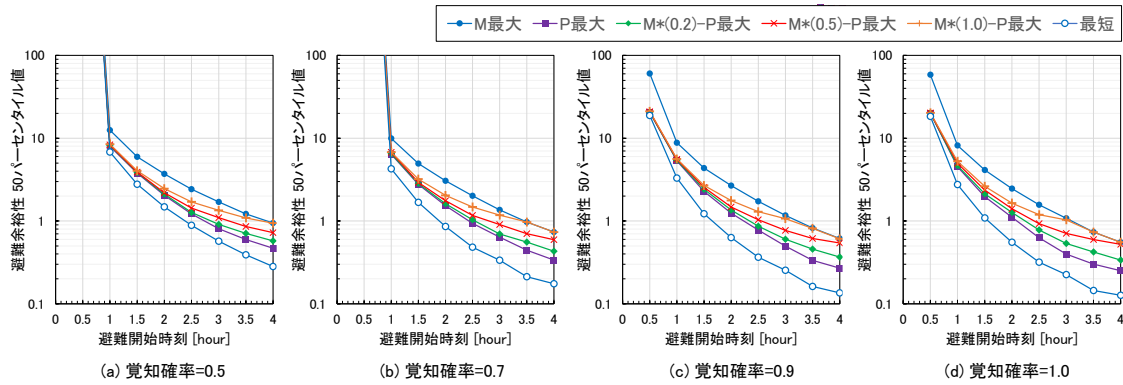


図 4-17 避難開始時刻に対する避難余裕性の推移 (西大井一丁目)

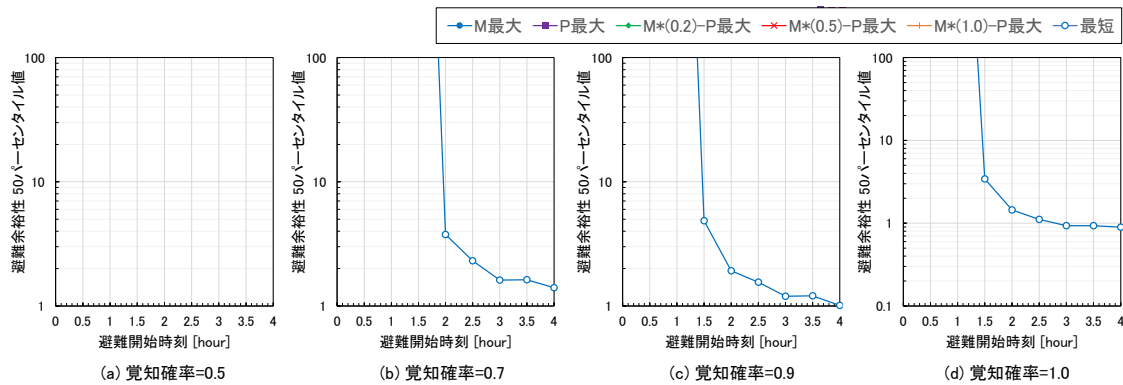


図 4-18 避難開始時刻に対する避難余裕性の推移 (東大井五丁目)

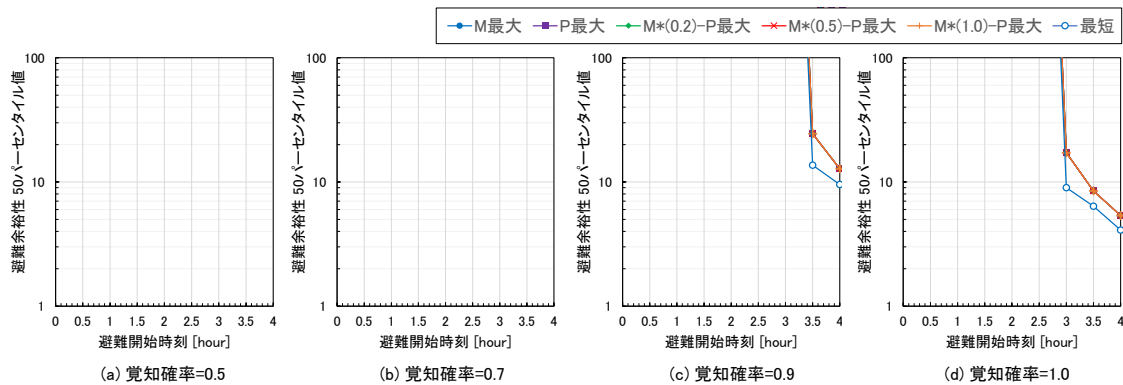


図 4-19 避難開始時刻に対する避難余裕性の推移 (南大井五丁目)

4.3.6 避難経路の特徴のまとめ

本節では、避難経路規範別の避難可能確率及び避難余裕性の特徴について考察した。その結果、以下の知見が得られた。

- **M*-P** 最大経路は **P** 最大経路と最大余裕経路を折衷した経路であり、覚知火災を必要な程度だけ迂回しつつ、避難可能確率が高い建物密度が低い地域を通過する経路が選択される。
- 避難開始時間が早ければ、必要余裕性を確保しても、避難可能確率は損なわれにくい。ただし、避難開始時間が遅れる場合、避難余裕性の確保が困難となり、最大余裕経路が選択され、必要余裕性を確保しない場合と比較して避難可能確率が低くなる。
- 避難可能確率に大きく影響する外的要因は、覚知確率であり、1に近い十分大きな値でない限り、避難開始時間が遅れるほど避難可能確率低下する傾向がみられる。
- 避難余裕性は、避難開始の遅れとともに低下し、避難余裕性の確保を考慮しない最短経路では、早期の段階で余裕のない経路が選択される。
- 最大余裕経路を選択することで、早期の段階から最大限の避難余裕性が確保される。
- **P** 最大経路と最大余裕経路はともに相関が確認され、**P** 最大経路でも避難余裕性が、最大余裕経路でも避難可能確率がある程度確保される。
- **M*-P** 最大経路は、避難余裕性が十分に確保できる早期の段階では、避難可能確率の最大化に重点が置かれ、避難余裕性の確保が困難な避難開始が遅れた段階では、避難余裕性の確保が優先される、**P** 最大経路と最大余裕経路の双方のメリットを有した経路が選択される。

4.4 動的更新による火災遭遇リスクの低減効果

本節では、動的更新による火災遭遇リスクの低減効果を検証するために、避難経路別に火災遭遇率の比較を行う。

4.4.1 実験の目的

前章では、火災リスクが均質な格子状市街地を対象として P 最大経路(最短経路)の動的更新有無による火災遭遇リスクの低減効果を明らかにした。一方、不均質な実市街地においては、最短経路と P 最大経路が異なるほか、避難余裕性の確保による経路選択の違いが前節によって明らかにされた。特に、避難余裕性の確保を伴う場合、覚知火災に対して大きく迂回した経路が選択されるため、こうした迂回を逐次行うことでより大回りになることが懸念される。

そこで、本節では、誘導経路規範別に動的更新によるシミュレーションを行い、非火災遭遇率(「1-火災遭遇率」)を比較することで、動的更新による火災遭遇リスクの低減効果について、避難経路の特性も踏まえて検証・考察する。

4.4.2 実験条件

表 4-4 に実験条件を示す。4.3.1 と同様な条件で、避難開始時刻の遅れに伴い避難可能確率の低下がみられた中延四丁目を対象として実験を行う。本節では、未覚知火災の不確実性が大きい「覚知確率=0.5」のケースと未覚知火災の不確実性が小さい「覚知確率=1.0」のケースを比較することで、覚知確率による影響を考察する。

表 4-4 実験条件

モデル	パラメータ	値
市街地モデル	対象圏域	大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域
	x_s	中延四丁目
	風速	8 [m/h]
地震火災 シミュレーション	ρ	3.0×10^{-6} [件/m ²]
	v_f	100 [m/h]
覚知情報 シミュレーション	r	0.5, 1.0
	Δt	0.1[h]
避難行動 シミュレーション	v_w	2000 [m/h]
	T_s	1.0, 2.0, 3.0 [h]

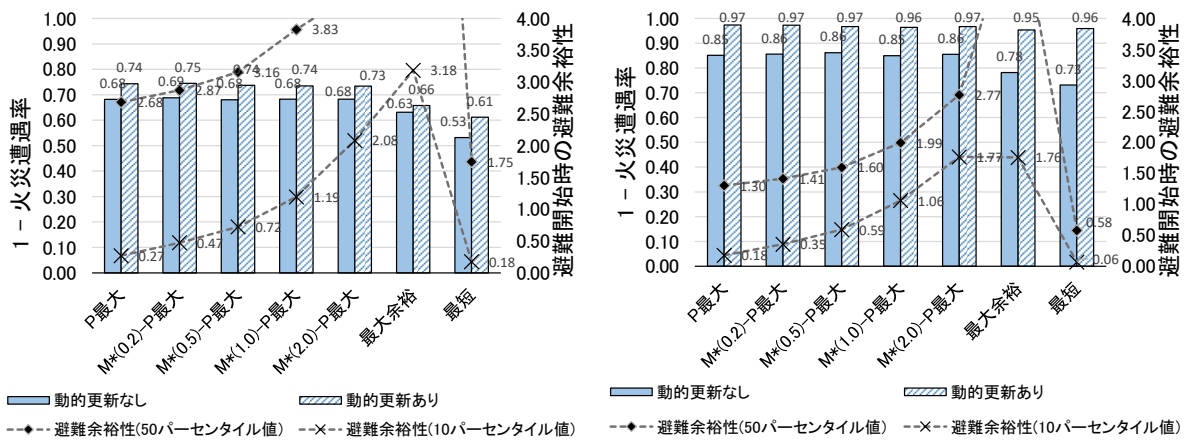
4.4.3 動的更新の有無による火災遭遇率の比較

図 4-20 から図 4-22 に、地震発生 1 時間後に避難開始する場合の避難経路規範別・動的更新の有無による非火災遭遇率(「1 - 火災遭遇率」)の比較を示す。いずれの避難開始時刻・避難経路規範において、動的更新によって非火災遭遇率は向上しており、動的更新による火災遭遇リスクの低減効果が確認できる。ただし、覚知確率の違いおよび避難開始時刻によって効果の大小が異なる。

a) 覚知確率による動的更新の効果の違い

動的更新による火災遭遇リスクの低減効果は覚知確率が低いほど小さい。第一に、動的更新の有無に依らない要因として、避難開始時期を見逃している可能性が考えられる。覚知確率が低い場合(本節では「覚知確率=0.5」のケース)、避難開始時には、すでに最遅避難時刻を迎え避難不能になっている可能性が高い。覚知確率が低いほど、限られた火災によって避難経路が探索されるため、避難経路が発見されやすく、その分、避難開始時期が見逃されている可能性が高い。第二に、動的更新による経路の変更頻度の違いが考えられる。覚知火災情報は、一定間隔で更新されるため、その間に新たな火災が覚知されなければ、避難経路の変更に繋がらない。覚知確率が高い場合、新しい火災が覚知される可能性が高くなり、毎回の経路更新によって次々に火災の迂回路が探索されていると考えられる。以上の特徴は、格子状市街地と同様な特徴と言える。

また、覚知確率が高い場合、動的更新を行うことで、経路規範間における避難成功率の差異が小さい。動的更新なしの場合において、P 最大経路及び M*-P 最大経路は、最短経路及び最大余裕経路と比較して、避難成功率が高い。これは、前節の避難可能確率の比較と同様な結果である。一方、動的更新ありの場合、「覚知確率=0.5」のケースでは、上述と同様に避難経路規範の間に違いがみられるが、「覚知確率=1.0」のケースではいずれも同程度(0.96~0.98)の避難成功率を示している。覚知確率が十分高い状態では、火災遭遇リスクの低減効果に対して、動的更新による火災迂回の寄与が避難経路規範の違いに対して非常に大きいことが示唆される。



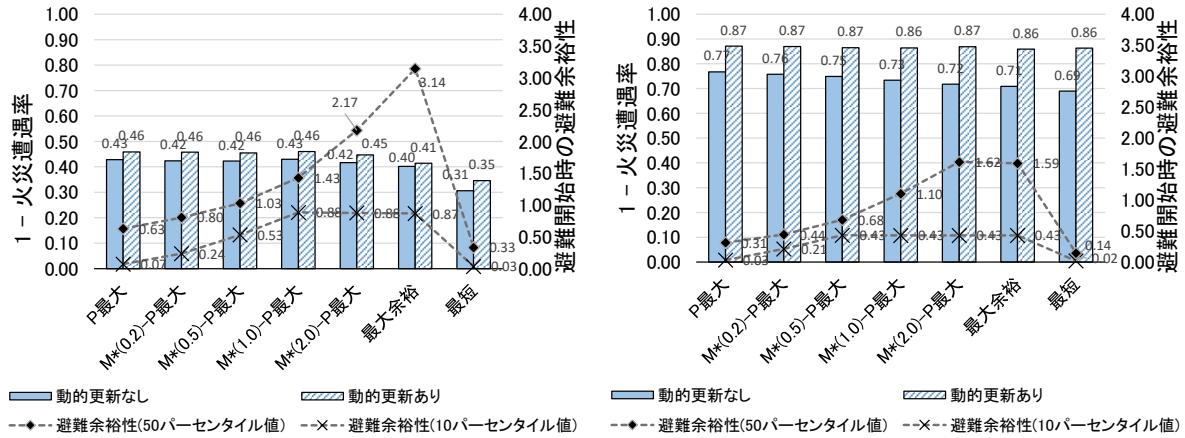
(a) 覚知確率=0.5

(b) 覚知確率=1.0

図 4-20 動的更新の有無による非火災遭遇率の比較(中延四丁目, 避難開始時刻=1[h])

b) 避難開始時刻による効果の違い

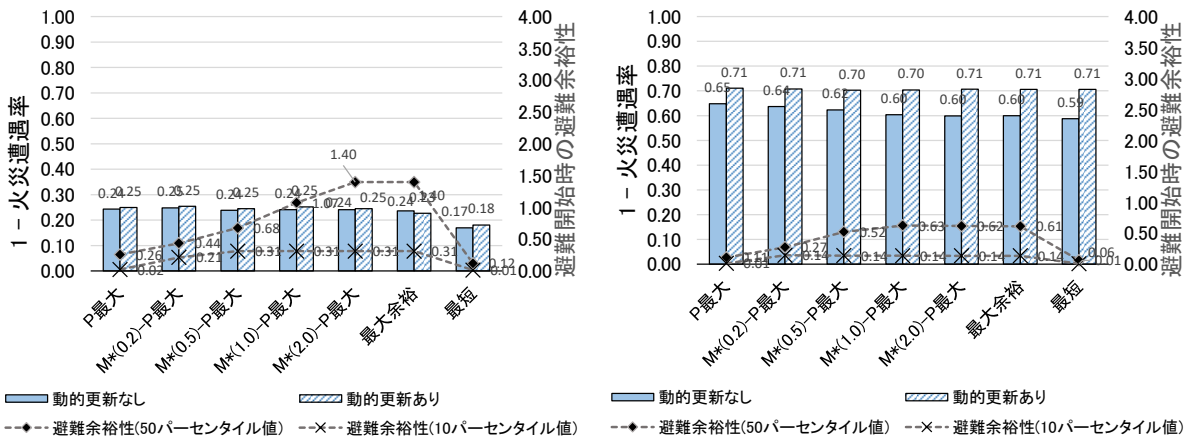
次に、避難開始時刻による違いを比較する。図 4-21，図 4-22 は、避難開始時刻が 2 時間後及び 3 時間後の、各経路規範における非火災遭遇率及び避難開始時の避難余裕性を示している。避難開始時刻が遅くなるほど、前述の避難開始時期を見逃す可能性が高くなるため、動的更新の有無に限らず、全体的に非火災遭遇率の低下が見られる。また、動的更新の効果自体も、避難開始時刻が遅れるほど低下しているように見える。特に、覚知確率が低い場合、避難開始時刻が遅れるほど、市街地上には延焼拡大した未覚知火災が多く存在するため、いずれかの火災への遭遇可能性は、動的更新のみでは改善できないと考えられる。特に、最大余裕経路及び M*-P 最大経路では、避難開始時刻が遅い場合、むしろ動的更新によって非火災遭遇率の若干の低下がみられる。これは、効果的に火災を回避出来ないことに加え、避難余裕性の確保のために大回りの経路を選択してしまうためである。ただし、非常に限定的なものであると考えられ、確保される避難余裕性と天秤にかけると、「必要余裕性=1.0」程度であれば、M*-P 最大経路を選択しても問題ないと言える。



(a) 覚知確率=0.5

(b) 覚知確率=1.0

図 4-21 動的更新の有無による非火災遭遇率の比較 (中延四丁目, 避難開始時刻=2[h])



(a) 覚知確率=0.5

(b) 覚知確率=1.0

図 4-22 動的更新の有無による非火災遭遇率の比較 (中延四丁目, 避難開始時刻=3[h])

4.5 小括

本章では、実市街地におけるリアルタイム動的誘導経路による避難誘導の頑健化(火災遭遇リスクの低減効果)を検証するために、大井競馬場・しながわ区民公園一带の避難圏域を対象としたリアルタイム避難誘導シミュレーションのケーススタディを行い、モンテカルロ法による確率的な検証を行った。

まず、一試行の出火状況及び避難経路を抽出し、GIS上に可視化することで、視覚的な特徴について考察した。その結果、P最大経路では、避難経路全体を俯瞰しつつ建物密度の高い領域を避け、最大余裕経路では覚知火災を十分に迂回する特徴が確認できた。また、M*-P最大経路では、P最大経路及び最大余裕経路を折衷した特徴がみられた。その後、モンテカルロ法の結果に基づき、避難開始時の各経路における避難可能確率及び避難余裕性の確率的特徴を把握した。

最後に、避難経路別・動的更新の有無別に非火災遭遇率の比較を行い、リアルタイム動的誘導経路による火災遭遇リスクの低減効果を確認した。一方、避難開始時刻の遅れと共に、その効果は限定的なものになり、遅い時期の避難開始では高確率で火災に遭遇することも明らかとなった。また、最大余裕経路及びM*-P最大経路では、余裕性を確保するように動的更新が行われることで、逆に非火災遭遇率が減少することが確認された。ただし、その増加量は限定的なものであり、避難余裕性の確保による安全上の意義を考慮すると、M*-P最大経路は十分に意義のある経路であることを主張した。

以上のように、避難誘導経路による火災遭遇リスクの低減効果が明らかになった。特に、M*-P最大経路は、未覚知火災の存在及び延焼予測のばらつき双方に対して火災遭遇リスクの低減効果が期待でき、不完全情報下の避難経路として適切であると言える。ただし、避難開始時刻を適切に設定しなければその効果は限定的であることも明らかとなった。また、本モデルでは火災の遭遇によってリスクを評価したが、火災遭遇後も避難を継続することで、避難者の安全が確保される可能性については議論しなかった。次章では、上記の安全確保の議論も踏まえて、適切な避難開始時刻の設定方法について検討する。

第 5 章

最遅避難時刻の不確実性を考慮した避難開始時期
決定モデルによる見逃しリスクに対する頑健化

第5章 最遅避難時刻の不確実性を考慮した避難開始時期決定 モデルによる見逃しリスクに対する頑健化

5.1 本章の目的と構成

第2章では、火災への遭遇リスクを低減することを目的として、避難者の動的避難経路モデルを構築した。動的避難経路モデルは、避難者が避難開始するとき、避難経路が残存しているときに有効となるモデルである。シミュレーション実験では、避難開始時期の遅れに伴い、避難経路が途絶している可能性が高くなる。加えて、避難開始時期が遅れるにつれて、避難誘導の効果が減少する傾向が見られた(最短経路と動的誘導経路モデルの差が小さい)。したがって、避難経路が途絶する前に、更には、誘導効果が得られる時期に、避難開始することが非常に重要である。地震火災時に避難開始時期を決定するモデルとして、李・増山・梶の一連の研究([増山, 梶 1984] [増山, 梶 1985] [李, 梶 1992])によって、最遅避難理論が提案されている。最遅避難理論とは、火災延焼による各道路の閉塞時間を所与として、居住・就業地に最も遅くまで留まることができる避難開始時刻(以下「最遅避難時刻」)と実現する避難経路で避難する方法である。最遅避難時刻を把握して避難することで、初期消火活動や救助活動等の共助活動における見切り限界の確保し、避難時期の見逃し防止が期待できる。

しかしながら、不完全情報下では、最遅避難理論に基づく避難は現実には不確実でリスクの高い避難になることが予想される。覚知火災情報は、火災全体の一部分であるため、覚知火災情報によって閉塞される道路の制約は緩くなり(より遅い閉塞時刻・より少ない閉塞道路)、これに基づいて計算される最遅避難時刻は実際の最遅避難時刻よりも遅い時刻が評価される可能性が高く、正確な把握が困難である。加えて、最遅避難時刻には、すでに多くの避難経路が途絶した状況にあるため、残されている避難経路は非常に限られている。そのため、覚知火災情報に基づいて得られる避難経路が上記の限られた残存経路と異なった場合、直ちに逃げ惑いとなる。実際に、第3章及び第4章のシミュレーション実験では、避難開始時期が遅い場合には非常に高い確率で火災に遭遇している。以上より、不完全情報下では、実際の最遅避難時刻を見逃さないこと、そして、実際の最遅避難時刻に対して十分に余裕時間を考慮して避難開始することに注意し、実際の最遅避難時刻よりも早期に避難開始時刻を設定する必要がある。

そこで本章では、不完全情報下において避難場所に到達できる可能性が十分に高い避難開始時期を決定するモデルとして、(i)最遅避難時刻と避難開始時刻の相対比(以下「最遅避難時刻比」)による安全に避難が可能である時期(以下「安全避難比」)の決定方法を提案し、安全避難比となる避難開始時期を見逃さない方策として、(ii)避難者が予め避難開始時刻を定めておく事前計画避難、(iii)覚知火災情報に基づき見逃し可能性を評価しつつ避難開始時期を逐次的に決定する勧告避難の2つの避難開始時期決定モデルを構築する。

本章の構成は次の通りである。

まず、5.2 節では、本章で想定する避難開始時期のシナリオを示し、避難開始時期の見逃しを防ぐための避難開始時期モデルの方針を示す。第2章で示したシナリオを基本として、自由避難モデルと呼ぶ火災遭遇後における避難者の自由意思による避難モデルを定義することで、火災への遭遇後も継続する避難によって避難完了の条件を再定義する。

5.3 節では、十分に安全に避難が可能な避難開始時期について、避難誘導シミュレーションに基づき最遅避難時刻に対する比率である最遅避難時刻比によって表す方法を示す。避難誘導シミュレーションに基づいて避難リスクが十分に低い時期について、閾値となるリスクを許容リスクと定義し、最遅避難時刻に対する相対的な時期として安全避難比を求める方法を示す。またこの時、避難者と出火点パターンとの関係を考慮し、避難者にとってより避難困難な出火点パターンを「上側避難」と定義し、上側避難に合わせた避難開始時期決定を行う。

5.4 節では、最遅避難時刻の確率分布に基づき予め固定的な避難開始時刻を設定する、「事前計画避難」の避難開始時期を決定するモデルを構築する。最遅避難時刻を迎えている確率を「最遅避難閾確率」と定義し、この値が一定の値を満たす避難開始時刻を、最遅避難時刻の確率分布より抽出する。

5.5 節では、連結信頼性と呼ばれるネットワーク解析手法を応用し、覚知火災情報に基づいて、逐次的に最遅避難時刻の確率を評価し、「最遅避難閾確率」を満たした時に避難開始を促す勧告避難の避難開始時期を決定するモデルを構築する。

最後に、5.6 節において、許容リスクを満たすように事前計画避難と勧告避難の最遅避難閾確率の調整することで、避難開始時刻を遅延化し、避難開始までの猶予時間を最大化する方法を提案する。

5.2 避難時期を見逃さないための避難開始時期決定方法の枠組み

5.2.1 本章で想定する避難開始時期のシナリオ

第2章では、避難開始時期を固定した避難誘導シナリオを設定した。本章では、第2章で設定したシナリオに避難開始時期を火災状況に対応し逐次変更するシナリオを加える。

図5-1に避難開始時期のシナリオを示す。図中の各軸は、地震火災シナリオ、火災覚知シナリオ、地震火災・覚知火災シナリオに対する避難のきっかけとなる状況及び避難のきっかけに対する避難開始時期のシナリオについて、地震発生後の時間推移を示している。

本研究では、「地震火災の接近」と「避難誘導による促進」のみを避難のきっかけとする合理的に避難開始時期を決定する避難者を想定する。避難開始後は、避難場所に到達するか避難場所までの経路が途絶えるまで避難を継続する。実際の災害時の避難開始時期は、当避難者のリスク認知や用事、避難場所との往復等、迫る火災の危険以外の要因が大きく影響することが知られている([久松, 伯野 1972])。本研究では、こうした個人の主観的判断には踏み入れず、客観的な火災の危険(「地震火災の接近」)に対してのみ避難のきっかけを持つ合理的な避難を実施する避難者を想定することで、避難誘導による促進有無を比較することで、本研究の避難開始時期決定モデルの効果を評価することを意図している。また、第2章では、火災に遭遇するまで避難を継続していたが、本章では火災に遭遇した後について、避難誘導には従わずに自由意思によって避難を継続する「自由避難」を導入する。自由避難を導入することで、避難場所への到達可能性として避難の頑健性を再定義する。自由避難については、次項で詳述する。

避難開始のきっかけには、避難開始地点への火災の接近、潜在的な避難リスク、覚知火災情報に基づく避難リスクの3種類を想定する。

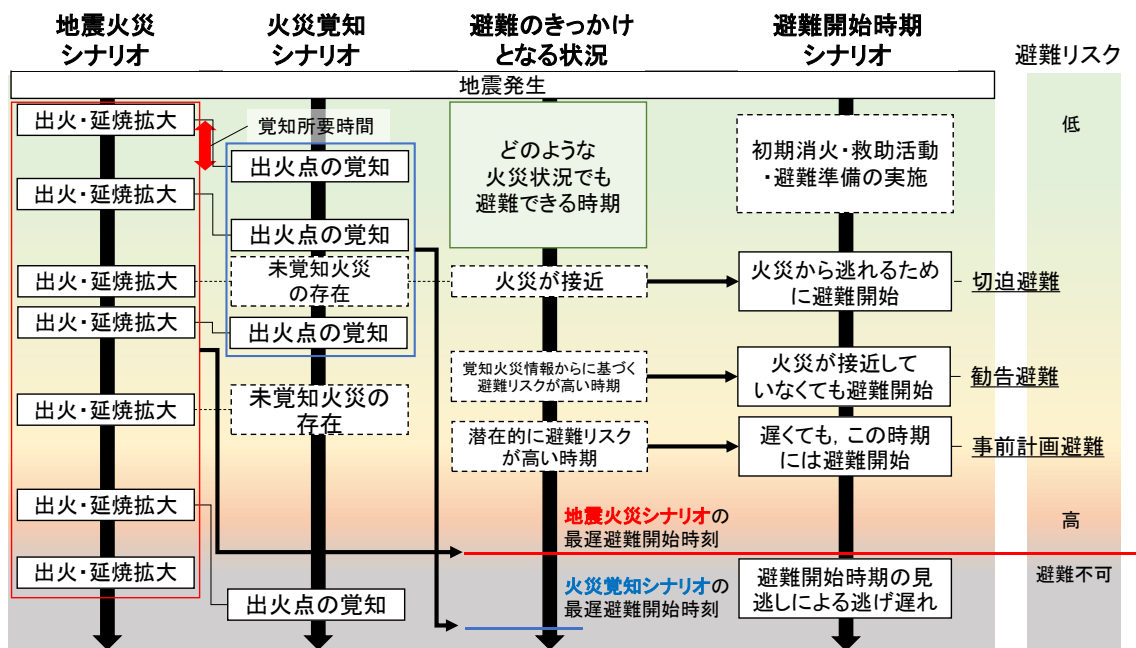


図 5-1 避難開始時期のシナリオ

5.2 避難時期を見逃さないための避難開始時期決定方法の枠組み

第一に、避難者は自身が待機している避難開始地点への火災の接近によって、火災から逃れるために避難開始する。これを切迫避難と呼ぶ。[熊谷, 岸 1983]では、酒田大火・関東大震災の避難行動を分析することで、平常時の単一火点の市街地火災、地震時の単一火点及び複数火点の市街地火災に対する住民が避難を開始する火災との距離(「見切り距離」)について明らかにしている。見切り距離の平均は、「平常時(酒田大火, 118.4[nm])<地震時単一火点(関東大震災, 231.4[nm])<地震時複数火点(関東大震災, 312.1[m])」であり、多くの避難者は複数の火点に囲まれるほど、大きな見切り距離で避難開始している。ただし、いずれも 100[m]単位の標準偏差を有しており、累積の避難率が 100%になるには 50[m]を切ってしまう。したがって、地震火災時の避難の最悪なケースを想定すると、避難開始時期に関する情報が無い中では、火災が避難者間際まで接近して初めて接近することになり、これに対して、避難誘導効果を評価することが重要である。

第二に、避難者は、避難開始地点の潜在的な避難リスクに対して予め定めた限界時刻によって、自主的に避難開始する。これを事前計画避難と呼ぶ。事前計画避難は、ハザードマップ等によって住民に周知される避難情報に基づく避難を想定しており、避難開始時期に関する事前計画の位置づけである。東京都等で提供されている事前的な地震火災の災害情報は、避難のフローチャートや火災リスク情報、避難路・一次的な避難先・広域避難場所が中心であり、「いつまでに」という時間的な情報は無く、本研究の事前計画避難はこうした情報提供の指針となると考えられる。

第三に、避難者は覚知火災情報に基づく避難リスクが、ある閾値を越えたことによって、避難勧告に促されるように避難開始する。これを勧告避難と呼ぶ。勧告避難は、行政による呼びかけによる避難であり、覚知火災情報の運用に強く依存する。東京都の各区の地域防災計画における地震時の避難勧告・指示の基準は不明確である。火災の発生と避難の切迫性は必ずしも一致するわけではなく、本研究の避難勧告の判断手法が今後の具体的な方針整備に資することが期待できる。

本研究では、切迫避難、事前計画避難および勧告避難によって定まる避難開始時刻において、最も早い時刻で避難開始するものとする。切迫避難は地震火災の出火パターンに応じて決定し、避難誘導によって制御できない避難開始時期であり、避難誘導を行わない限り、避難者は火災に遭遇する限界まで留まることを意味している。これに対して、事前計画避難及び勧告避難による避難誘導によって、避難開始時刻を避難の危険性に応じて早めることで、避難者の安全確保が図られる。

5.2.2 自由避難モデルによる避難誘導の頑健性の再定義

第2章において、避難誘導時に火災へ遭遇することを避難のリスクとして、避難誘導時の火災への遭遇しにくさを避難誘導の頑健性と定義した。しかしながら、本定義は誘導支援者側の視点における「ある時点の火災情報において避難可能であるときに、未覚知火災への遭遇可能性が低い避難経路」に対する信頼性の評価に過ぎず、避難誘導の対象者(=避難者)の安全性の検証には至っていない。

a) 「逃げ惑い」に対する避難誘導の頑健性

一方、地震火災時の避難誘導に求められることは、避難者が最終的に避難場所に辿り着けることであり、未覚知火災遭遇後も、避難者が自力で火災を避けながら避難場所に到達できるなら安全と言える。すなわち、避難誘導によって、避難者が自力で避難場所へ到達できるような避難場所周辺の比較的安全な領域まで誘導できるならば、これも評価対象として考慮する必要がある。そこで、本章では、火災に遭遇した後に継続する自主的な避難を自由避難と定義し、自由避難も通しても避難場所に到達できない可能性の低さを、避難誘導の頑健性と再定義する。本研究では、最終的に避難場所までの経路が全て途絶され、避難場所に到達できない状況を「逃げ惑い」と呼ぶ。

b) 自由避難モデルの方針

自由避難のモデル化にあたり、「避難誘導の効果」及び「火災遭遇後の逃げ惑い」を評価できるようにするため、以下の2点に留意する。第一に、避難者が遭遇した火災は、避難誘導側の覚知火災に加えないことである。本研究において、火災の覚知は避難者と誘導者の相互の情報伝達も含めて、乱数に基づき外生的に与えられている。したがって、シミュレーション上で遭遇した火災を避難誘導に反映した場合、想定以上の覚知火災を考慮することになってしまう。第二に、避難者が未覚知火災に遭遇した後は、避難誘導よりも非効率な避難行動であり、かつ、避難誘導の効果が無効にするような非合理的な行動であってはならないことである。そこで、本研究では自由避難を「避難開始以降、最初に火災に遭遇した後、誘導経路を無視し、これまでに遭遇した閉塞地点及び目の前の閉塞地点のみを避けつつ、最短経路で避難場所まで移動する避難」と定義しモデル化する。避難誘導のように、避難圏域を俯瞰的にみて火災状況を把握できないまでも、避難者にとって局所的な火災状況については回避できる避難行動である。

b) 自由避難モデルの概要と避難完了条件

図5-2に、自由避難モデルの避難過程の模式図を示す。左上の時刻 T_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)は経過時刻を表している。避難者は、一定の道路距離以内の火災認知範囲(図5-2中、赤破線円)における道路の閉塞時刻を認知でき、通行可否判断が可能であるとする。一度認知した道路閉塞(図5-2中、橙色部分)は、避難終了まで記憶するものとする。自由避難へ移行した後(時刻 T_1)、認知範囲の道路閉塞を避けた最短経路(以下「自由経路」)で避難場所への移動を開始する。避難者の移動に対応して災認知範囲は推移し、認知範囲内の道路閉塞に対して最短経路が更新される(時刻 T_2 , 時刻 T_3)。避難場所に到着するまで、認知範囲及び自由経路の更新を続け移動する(時刻 T_4 , 時刻 T_5)。最終的に、避難場所に到達した場合に避難成功、自由経路が探索不能となった場合(=避難者から避難場所までの全経路が途絶)に避難不能となり、避難を終了する(時刻 T_6)。

5.2 避難時期を見逃さないための避難開始時期決定方法の枠組み

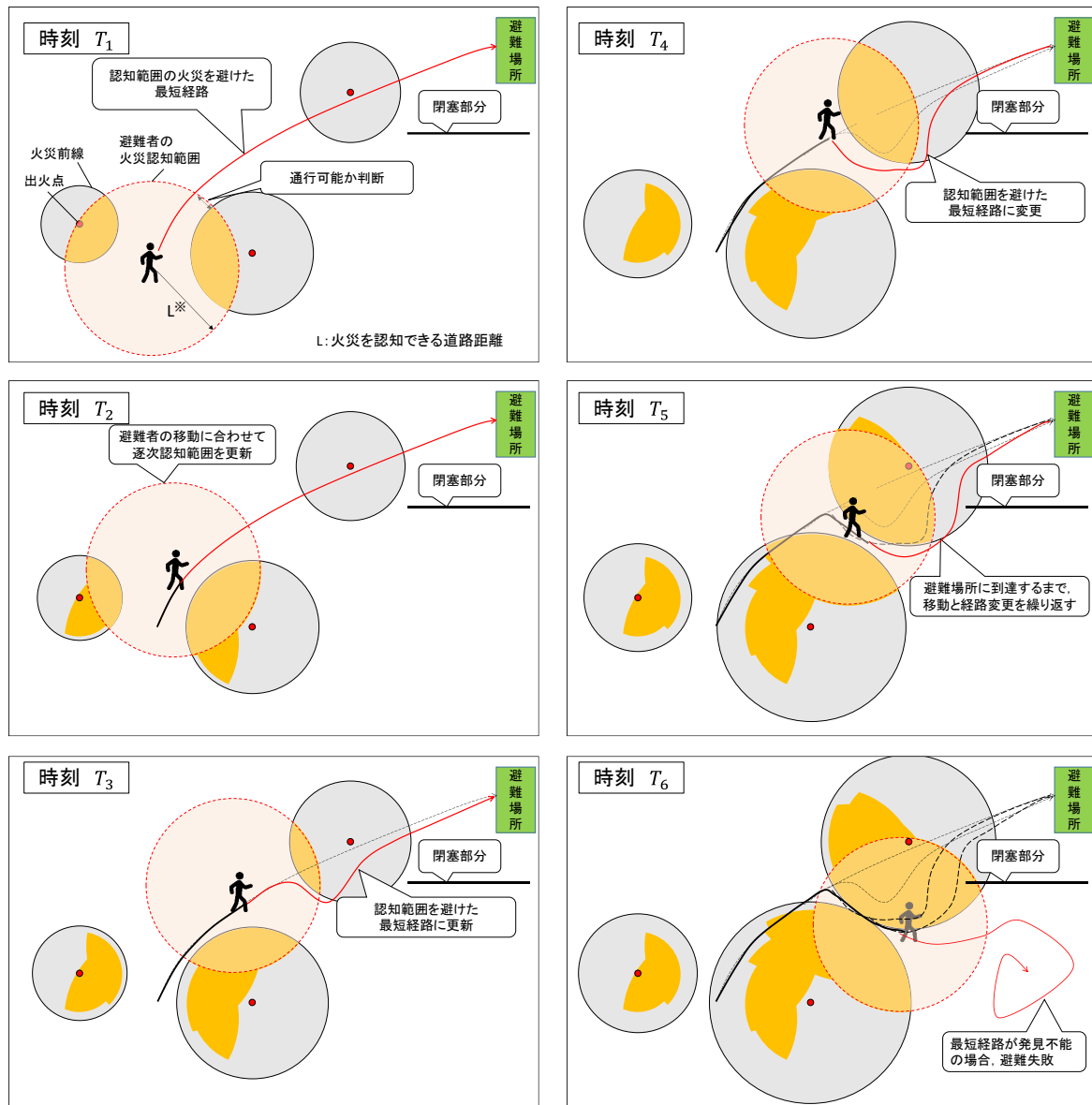


図 5-2 自由避難モデルの避難過程

5.2.3 避難開始時期の見逃しを防ぐための避難開始時期決定方法の方針

地震火災時には、最遅避難時刻がひとつの避難限界となることを述べた。加えて、最遅避難時刻には、多くの経路が途絶されており、不完全情報下において適切な経路で避難することには困難を要する。そのため、最遅避難時刻に残存する経路上のノード以外に移動した場合、直ちに避難不能となる(ここで言う避難とは、避難場所に到達することである)。したがって、最遅避難時刻に対して、幾分か早くに避難を開始することが求められる。本研究では、このような最遅避難時刻に対して前倒しされた、避難の安全上、十分に早い避難開始時刻を「安全避難開始時刻」と呼ぶ。

a) 安全避難開始時刻

安全避難開始時刻は、最遅避難時刻を基準とするため、地震火災の出火パターンに応じて異なる。そこで、最遅避難時刻に対する避難開始時刻の相対比(以下「最遅避難時刻比=避難開始時刻/最遅避難時刻」)を考え、これが十分に安全な比率(以下「安全避難比」)となる避難開始時刻をもって、安全避難開始時刻を評価する。本研究では、各モデルのパラメータ・避難属性別に様々な避難開始時刻に対してリアルタイム避難誘導シミュレーション実験し、避難誘導上、十分な安全を示す「許容リスク」に対して、「逃げ惑い」に陥る可能性が「許容リスク」を満たすような安全避難比を予め導出しておき、リアルタイム避難誘導において、安全避難比を満たすような避難開始時刻を決定する方法を検討する。

許容リスクは、避難における生命の安全を規定する重要な指標であるため、慎重に検討する必要がある。[木村ら 2008]は広域避難時の被災リスクの抑制水準として、平常時に抱えている不慮の事故による死亡リスク(「人間の一生を 80 年とした時に不慮の事故で死亡する確率=約 0.02」)を参考にしている。しかしながら、一度きりの地震火災とこうした生涯のリスクを比較することの妥当性について疑問が残る。その他の方法として、本研究では、本項の c)でも述べるように初期消火活動や救助活動の時間確保を目的とした避難開始時刻の遅延化を試みるため、こうした活動による減災効果との比較を行うことも考えられる。[岡本, 糸井川 2018]は、住民の初期消火活動による地域全体の最遅避難時刻の延長効果を明らかにするに際し、最遅避難時刻について完全情報を仮定し、初期消火に従事する消火班個人の最遅避難時刻と延長効果を天秤にかけることで、初期消火活動や出火警戒のための見切り時刻の設定方法について検討している。以上、本研究では減災効果にまで立ち入ることができなかつたため、具体的な許容リスクの設定方法については今後の課題とするが、許容リスクの設定方法の重要性について示しておいた。

b) 見逃しを防ぐための避難開始時刻の決定方法

災害時には、避難の開始時期を見逃さないことが重要である。地震火災時においても同様であり、事前計画避難及び勧告避難によって、安全避難開始時刻を見逃さない方法を検討する。言い換えると、常に、安全避難比よりも最遅避難時刻比が小さくなるように避難開始時刻が決定される方法を検討する。しかしながら、不完全情報下では、実際の最遅避難時刻を確実に把握することは困難であり、最遅避難時刻比も不確実性を有する。そこで、この最遅避難時刻比が安全避難比よりも大きくなる、すなわち、安全避難開始時刻を見逃す確率に対して許容値(以下「最遅避難閾確率」)を設定して避難開始時刻を決定する。

まず、事前計画避難における避難開始時刻決定方法の方針を示す。事前計画避難では、

5.2 避難時期を見逃さないための避難開始時期決定方法の枠組み

最遅避難時刻の確率分布評価に基づき避難開始時刻を設定する。[渋木, 糸井川 2016]は、ランダムな出火点パターンに対する最遅避難時刻を繰り返し評価するモンテカルロシミュレーションを実施し、各地域の最遅避難時刻の期待値を求めている。本研究では、[渋木, 糸井川 2016]を応用し、最遅避難時刻を迎える確率が「最遅避難閾確率」と等しい時刻に安全避難比をかけ合わせた時刻を事前計画避難の避難開始時刻として設定する。

次に、勧告避難における避難開始時刻決定方法の方針を示す。勧告避難では、覚知火災情報に基づき避難開始時期の判断を行う。本研究では、第2章で示した PUSH 型の避難情報伝達を考える。すなわち、一定間隔の情報更新の中、その時々において勧告する時期か否かを、リアルタイムで判断する。ここで、モデルの簡便化のために、避難者への情報伝達時間は考慮せずに、その時期が勧告時期であるかをどのように判断すべきか考える。地震後の経過時刻に対して、出火点の増加及び延焼拡大が進むことで、ネットワーク上の各道路が閉塞するため、最遅避難時刻を迎えている確率は増大する。換言すれば、ある時刻において最遅避難時刻を迎えていない確率は減少するため、避難勧告を発令しなければ、いずれ上記の確率が一定の値に収束する。この中で、ある時点で避難勧告を発令すべき条件は、その時点の避難勧告を見送った場合に安全避難開始時刻を見逃してしまうことである。言い換えると、次の判断時刻以降に安全避難開始時刻が存在することである。すなわち、最遅避難時刻が次の時点の時刻を安全避難比で除した値よりも早い時期に存在する確率を計算すればよい。本研究では、この確率を連結信頼性に基づいて導出する。連結信頼性とは、ネットワークの信頼性解析の一手法であり、ある OD 間が連結している可能性を評価する手法である([若林 1989])。最遅避難時刻とは、避難開始地点から避難場所までの全ての経路が途絶する時刻である。そこで上記で示した将来に覚知火災によって閉塞されない経路について連結信頼性を評価するのに十分な数だけ探索し、その全経路が途絶している確率を評価し、その確率がある「最遅避難閾確率」を越えた場合に避難勧告を発令する手法を検討する。

c) 避難開始までの猶予時間の確保を目的とした避難開始時刻の遅延化

図 5-3 に、図 5-1 のシナリオを基にした避難の見逃しを防ぐための避難開始時期の決定方針の全体像を示す。地震発生後、時間遅れで出火点が発生していき、これらによってある最遅避難時刻が定まる。しかし、不完全情報下ではこの地震火災シナリオの最遅避難時刻を把握することは困難である。そこでまず、発災前の平常時の備えとして、シミュレーション実験による安全避難比の評価と最遅避難時刻の確率分布に基づいた安全避難開始時刻の事前評価によって、事前計画避難の避難開始時刻を設定しておく。発災後、時々刻々と収集される覚知火災情報に基づき、火災覚知シナリオの最遅避難時刻を求めるとともに、その都度、次点の判断時刻を安全避難比で除した時刻について連結信頼性に基づいて最遅避難確率の評価を行う。この最遅避難確率が「最遅避難閾確率」を越えたとき、直ちにただちに勧告避難を実施する。避難者はこうした事前計画避難・勧告避難によって定められた避難開始時刻に従うと同時に、自身に火災が接近した場合、これらを待たずに避難を開始する。

5.2 避難時期を見逃さないための避難開始時期決定方法の枠組み

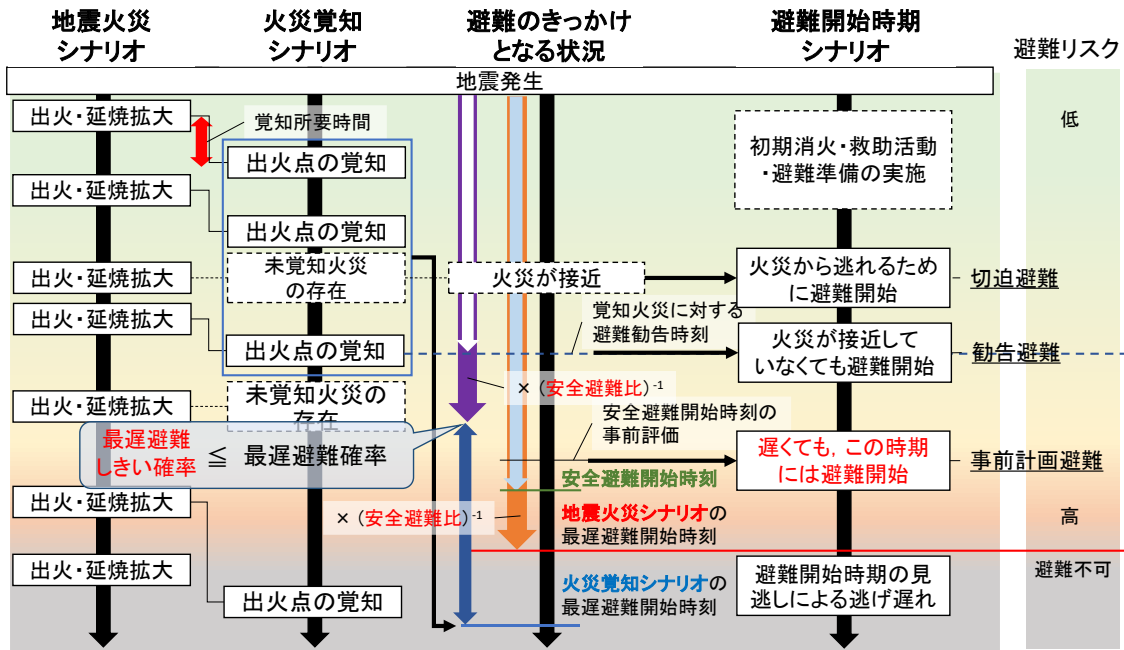


図 5-3 避難の見逃しを防ぐための避難開始時期の決定方針の全体像

以上のようなリアルタイム避難誘導に基づいた避難を開始するまでの時間が、住民が初期消火活動や救助活動、避難準備に費やせる時間である。「許容リスク」に対して事前計画避難・勧告避難の最遅避難閾確率を適切に定めることで、こうした時間を最大化、言い換えると、避難開始時刻の遅延化を行う。

5.3 許容リスクに基づく安全避難開始時刻の設定

本節では、事前計画避難及び勧告避難における目標とする避難開始時刻を定める方法として、許容される避難リスクに対する避難開始時刻を最遅避難時刻に対する相対比によって定める方法について述べる。

5.3.1 最遅避難時刻比による避難開始時刻の評価

目標となる避難開始時刻は、災害に対する避難の切迫性を考慮して定めることが重要である。地震火災時における避難の切迫性は、出火点の配置によるところが大きく、同じ避難開始時刻でも避難の切迫性は異なる。特に最遅避難時刻は、地震火災時における避難限界を与える重要な時刻である。例えば、地震発生3時間後において、最遅避難時刻が2時間半後・3時間後・5時間後それぞれの場合において、避難の切迫性は以下のように大きく異なる。

【地震発生3時間後の状況】

(1) 最遅避難時刻が地震発生2時間半後

既に全経路が途絶しており、避難が不能な状態。

(2) 最遅避難時刻が地震発生3時間後

避難限界までに猶予はなく、最遅避難理論に基づく経路(複数存在する可能性に注意)が唯一の避難経路であり、それ以外の経路を選択した場合、直ちに避難が不能となる状態。

(3) 最遅避難時刻が地震発生5時間後

避難限界まで2時間の猶予があり、最遅避難理論に基づく経路以外による経路選択の可能性が残された状態。

そのため最遅避難時刻を基準に避難開始時刻を定めることで、避難の切迫性を反映させた避難開始時刻が得られると考えられる。そこで本研究では、最遅避難時刻に対する避難開始時刻の相対比(53)によって避難開始時刻を評価する。これを「最遅避難時刻比」と呼ぶ。

$$a := \frac{T_s}{T_l} \quad (53)$$

a : 最遅避難時刻比

T_s : 避難開始時刻 [h]

T_l : 最遅避難時刻 [h]

最遅避難時刻比は0以上の値をとり、0に近いほど最遅避難時刻に対して早期の避難であることを意味し、1に近いほど切迫した避難であることを意味する。特に1を超える場合、最遅避難時刻以降の避難であり、避難不能であることを意味する。すなわち、リアルタイム避難誘導において、最遅避難時刻比は必ず1未満である必要がある。

5.3.2 上側避難と下側避難

出火パターン(出火点の位置と出火時刻の組み合わせ)が及ぼす避難への影響は最遅避難時刻への切迫性だけではなく、避難開始後の経路選択の制約に対する影響も大きい。図 5-4 に、出火パターンによる避難経路への影響に関する模式図を示す。一つの避難経路を考えた場合、その経路が途絶する限界時刻は、経路上の各地点の閉塞時刻より通過に要する時間を引いた時刻を通過までの猶予時間(通過猶予時間)とすると、現在時刻に通過猶予時間の最小値を足した時刻である。図中の出火パターンでは、左図の場合には火災 A、右図の場合には火災 B が限界時刻の原因となる火災であるとする。左図の場合では、避難者にとって後方の火災が避難限界の原因となる。後方の火災(左図、火災 A)に押し出される形で避難が開始するため、前方の火災による道路閉塞を待たずに避難開始となり、避難者にとって前方が開けた状態の避難が可能とある。一方、右図の場合では、避難者にとって前方の火災が避難限界となるため火災を横切る避難となる。そのため、避難開始の遅れによって右図の経路では避難不能になる可能性が高い。

以上の議論を道路ネットワーク全体に当てはめると、避難者にとって後方の火災を原因とした最遅避難時刻の場合には、避難者と避難場所の間が開けており、最遅避難時刻に数多の避難経路が残存することで、避難誘導及び自由避難による経路の軌跡がこうした残存経路を満たす可能性が高くなると考えられる。一方、後方の火災を原因としない最遅避難時刻の場合において、原因となる火災に対して最も効率の良い経路を辿る必要があり、避難誘導及び自由避難による経路の軌跡は、少しでも効率の悪い迂回経路を取った場合に避難不能となる。

そこで本研究では、最遅避難時刻の原因となる火災の位置関係に基づき、以下の定義によって地震火災シナリオを下側避難及び上側避難として分類する。下側避難とは、 $d_j < D$ となる全てのノード j について、以下の(54)を満たす出火点の配置である。また、(54)を満たさない場合、上側避難と定義する。

$$T_{l,j} > T_l + \frac{d_j}{v_w} \quad (54)$$

T_l : 避難開始地点の最遅避難時刻 [h] d_j : 避難開始地点から j への最短距離 [m]

v_w : 歩行速度 [m/h] (ただし、延焼速度 v_f に対して、 $v_w > v_f$)

D : 避難開始地点の最寄り点を定義するための距離 [m] (本研究では、100 [m] に設定)

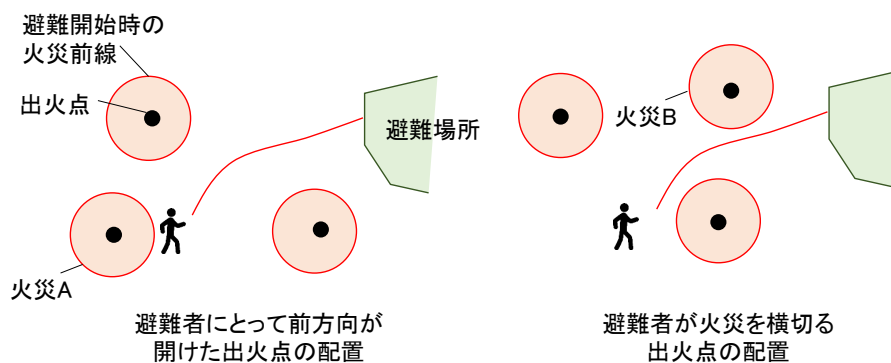


図 5-4 出火パターンによる避難経路への影響

5.3 許容リスクに基づく安全避難開始時刻の設定

(54)は、避難者が避難開始地点を距離 D 以内の近傍点へ移動することで、移動先において最遅避難時刻が延長されることを意味する。歩行速度が延焼速度よりも早い条件の下では、(54)が満たされる時、避難開始地点にとって最遅避難の原因となる火災から遠ざかることが可能である。一方、(54)が満たされないとき、近傍点への移動によって、最遅避難時刻が変わらないもしくは短縮される。そのため、避難者は、最遅避難の原因となる火災から遠ざかることが困難な状態の避難が強いられる。ゆえに、上側避難において、下側避難と同様な余裕を保ちながら避難するためには、より小さな最遅避難時刻比で避難することが求められる。リアルタイムの状況下ではこうした出火パターンの分類はできないため、以下の安全避難比の設定及び事前計画避難の確率分布評価において、全て上側避難の試行を対象として事前評価を行う。

5.3.3 許容リスクに対する安全避難比による安全避難開始時刻の設定

上側避難における逃げ惑いリスクが十分低いと言える時期に安全避難開始時刻を設定する。許容リスク p^* に対して、(55)が成り立つ最遅避難時刻比を安全避難比 α_s とする。

$$p^* = Prob(\delta_{suc} = 1 | T_s = \alpha T_l, \delta_{up} = 1) \quad (55)$$

δ_{suc} : 避難場所に到達できる場合 1, 避難場所に到達できない場合 0

T_s : 避難開始時刻 [h]

T_l : 全火災に対する最遅避難時刻 [h]

α : 最遅避難時刻比 ($0 \leq \alpha \leq 1$)

δ_{up} : 上側避難の場合 1, 下側避難の場合 0

ただし、(55)は解析的に求めることは困難であるため、試行毎に最遅避難時刻のみを完全情報として、最遅避難時刻に対して任意の最遅避難時刻比をかけた時刻を避難開始時刻に設定し、リアルタイム避難誘導シミュレーション実験を繰り返し実行し、 $\delta_{suc} = 1$ の確率を表す避難成功率(6.3.1)をパラメータ・避難経路別・動的更新有無別にテーブル関数化する。

図 5-5 に安全避難比のイメージを示す。

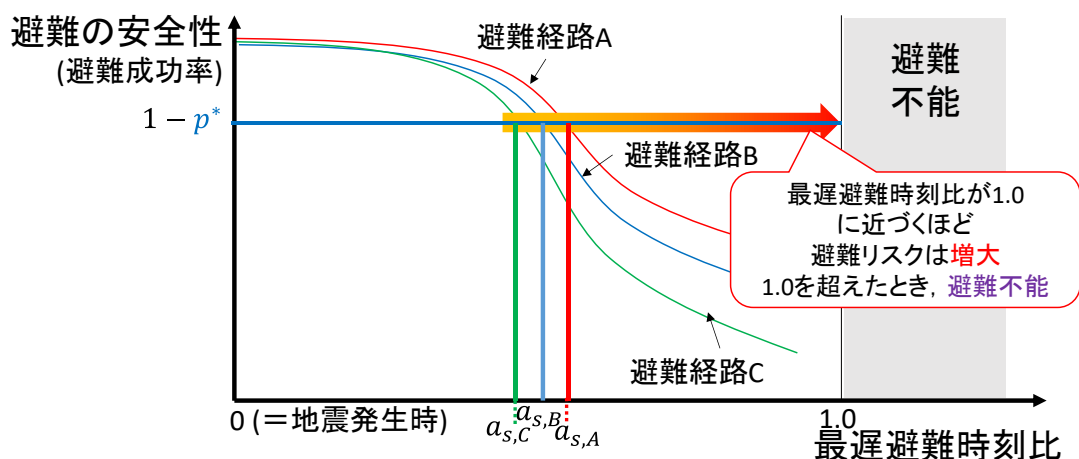


図 5-5 安全避難比のイメージ

5.4 事前リスク評価に基づく事前計画避難時刻

本節では、最遅避難時刻の確率的評価に基づいて、安全避難比を考慮し事前計画避難時刻を設定する方法について説明する。事前計画避難は、出火パターンに依らず、固定的な避難開始時刻を設定するため、火災に対する避難リスクの事前評価を行い、そのリスクが十分に低い時期に避難開始時刻を設定することが極めて重要である。そこで本研究では、最遅避難時刻の確率分布に着目した。[渋谷, 糸井川 2016]の手法によって、最遅避難時刻の確率分布を実験的に得ることで、最遅避難時刻を迎える確率が十分に低い時刻、言い換えると、最遅避難閾確率を満たす時刻を特定する。求めた時刻に対して、前節で示した安全避難比を乗じた値を事前計画避難時刻とすることとする。

5.4.1 シミュレーション実験に基づく最遅避難時刻の確率的評価

事前計画避難の避難開始時刻には、最遅避難時刻の確率分布に関する事前評価に基づき、固定的な時刻を設定する。事前計画避難の最遅避難閾確率 β に対して、(56)を満たす時刻 T^* を特定する。ここで、下側避難の場合には切迫避難によって経路が断たれる前の避難が可能であるのに対して、上側避難の場合、最遅避難以外のすべての経路が断たれる時刻であるため、上側避難のリスクに焦点を当てることにした。

$$\text{事前計画避難の最遅避難閾確率: } \beta = \text{Prob}(T_l \leq T^* | \delta_{up} = 1) \quad (56)$$

T_l : 全火災に対する最遅避難時刻

δ_{up} : 上側避難である場合 1, 下側避難である場合 0

以上の確率を事前に評価し、テーブル関数化しておくことで、リアルタイム避難誘導時に値を呼び出して利用する。なお、事前評価では、第3章で構築した地震火災シミュレーションで生成する出火パターンに対して[金井, 梶 2002]のアルゴリズムを適用し最遅避難時刻を算出するシミュレーションを繰り返し実行し、最遅避難時刻の確率分布を得た。

5.4.2 最遅避難の確率分布による避難開始時刻の設定

事前計画避難における避難開始時刻は、(57)によって予め設定しておく。

$$T_c = \alpha_s(p^*) * T_l(\beta) \quad (57)$$

$\alpha_s(p^*)$: 上側避難において許容リスク p^* を満たす安全避難比

$T_l(\beta)$: 上側避難において最遅避難時刻が最遅避難閾確率 β を満たす時刻 [h]

p^* : 許容リスク

β : 事前計画避難における最遅避難閾確率

5.4.3 事前計画避難に期待される避難開始時期の特徴

図 5-6 事前計画避難の設定によって得られる避難開始時刻に期待できる最遅避難時刻比の特徴の模式図を示す。固定的に避難開始時刻を定めることで、覚知状況に依存せず、一定のリスクを担保することが可能である。この時、本モデルによる事前計画避難時刻を設定することで、許容リスクに応じたリスクを設定できると期待できる。一方、リアルタイムの出火パターンを反映しない固定的な時刻であるため、許容リスク及び最遅避難閾確率を小さく取ると最遅避難時刻比は 0 の方にシフトし、より早期な避難開始時刻が設定され、大きな猶予時間の確保が困難になるデメリットも存在すると考えられる。

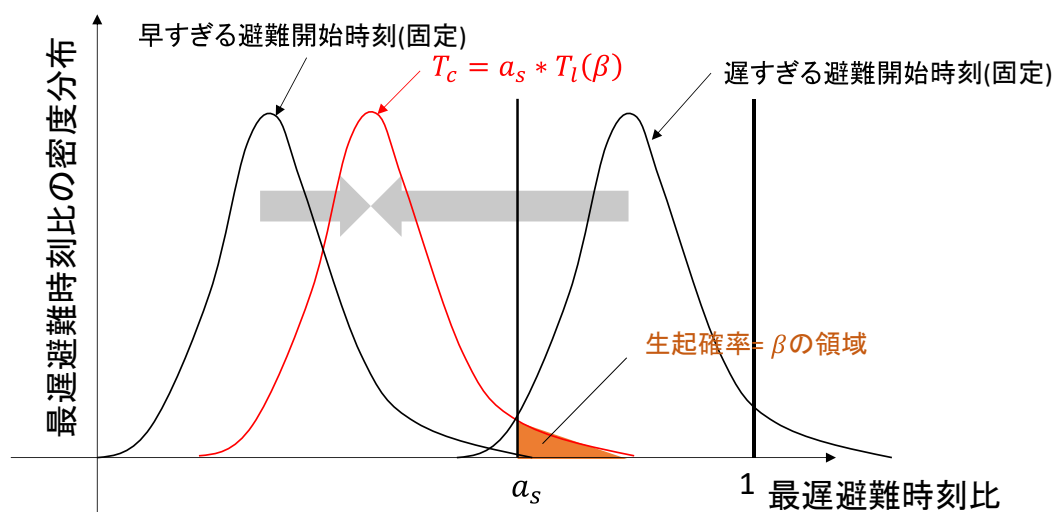


図 5-6 事前計画避難の避難開始時刻に期待できる最遅避難時刻比の特徴

5.5 連結信頼性に基づく勧告避難の決定判断

本節では、信頼性評価手法の一つである連結信頼性を応用し、ある時刻に勧告避難の決定判断を行う手法を示す。

5.5.1 連結信頼性による最遅避難確率の評価

最遅避難時刻は、その時点以降で考える全ての避難経路が途絶される限界時刻を意味する。従って、判断時刻において残存する各経路がある時刻までに途絶されている可能性によって、ある時刻までに最遅避難時刻を迎える可能性を評価できる。そこで、ネットワーク信頼性評価手法の一つである連結信頼性を応用する。連結信頼性とは、ネットワーク上のリンクにおいて機能障害が確率的に発生すると仮定した時、ある OD 間で機能障害の影響を受けずに到達可能か確率的に評価するものである([若林 1989])。OD 間にある経路が存在する条件は、経路を構成する全てのリンクが機能障害を起こしていないことである。すなわち、連結信頼性は、全ての経路のうち 1 つ以上の経路上で機能障害が起きない確率として表され、連結信頼度 r の厳密解は(58)である。

$$r = E \left[1 - \prod_{s=1}^N \left(1 - \prod_{a \in P_s} X_a \right) \right] \quad (58)$$

P_s : s 番目のミニマルパス (OD 間の経路のひとつ)

N : ミニマルパスの総数

r : OD 間のリンク信頼度

a : ミニマルパスを構成するリンク

X_a : 機能障害が発生していない場合 1, 発生している場合 0 を取る確率変数

ただし, $E[X_a] = r_a, r_a$ はリンク a が機能障害が発生しない確率

地震火災時における機能障害とは、避難者が通過する前に経路が火災によって途絶されていることであるため、本研究における各リンクの信頼性は第 2 章で求めた避難可能確率によって表すことができる。したがって、ミニマルパス上のリンク a が時刻 T に通過可能である確率は、(10)及び覚知火災による閉塞を考慮することで(59)で表される。

$$r_a := \begin{cases} p_{eva}(T_{jg}, T + t_{s,a}, a) & T + t_{s,a} < T_p(F_r, a) \\ 0 & T + t_{s,a} \geq T_p(F_r, a) \end{cases} \quad (59)$$

$p_{eva}(T_1, T_2, a)$: 判断時刻 T_1 , リンク a の始点を T_2 に通過するときの避難可能確率

T_{jg} : 判断時刻 [h]

T : 最遅避難時刻であるか評価する対象時刻 [h]

$t_{s,a}$: s 番目のミニマルパス上における a の始点までの移動時間 [h]

$T_p(F_r, a)$: 覚知火災情報 F_r に対する道路リンク a の閉塞時刻

(59)を(58)における X_a の期待値として適用することで、 $1 - r$ は、時刻 T までに最遅避難時刻を迎えている確率を評価できる。本研究では、この確率を「最遅避難確率」と呼ぶ。

5.5.2 最遅避難確率に基づく避難勧告の決定判断

避難勧告の決定判断の指針は、完全情報における安全避難開始時刻(最遅避難時刻に安全避難比を乗じた時刻)を見逃さないことである。そのためには、避難勧告を見送る場合に、次回の判断時に安全避難時刻を迎えていないことが条件であるため、次回の判断時刻を基準として安全避難比を除いた時刻に対して最遅避難確率を評価する必要がある。したがって、(59)に対して、 a_5^{-1} * 次回の判断時刻として最遅避難確率を求めればよい。

5.5.3 避難可能確率の厳密解算出における問題点

本研究で扱う大規模なネットワークにおいて、(58)の厳密解の算出には以下の 2 つの技術的な問題が存在する。

第一に、連結信頼性を評価するには、全経路のうち部分的に別の経路が存在しない経路(ミニマルパス)を十分な数探索し、その集合(ミニマルパスセット)を構築する必要があることである。大規模なネットワークには代替となる数多の経路が存在するため、全てのミニマルパスをリアルタイムに探索することは困難である。この問題については、連結信頼性の評価において、信頼度の高い経路から取得していくことで、上位の一部の経路によって連結信頼性を高精度に評価できることが確認されており、 n 番目最短経路探索によって選定していく方法等が提案されている([中川ら 1996])。この時、信頼性が高くとも類似した経路を多く採用した場合、(58)において同時に閉塞判定されるミニマルパスが多くなり、結果、信頼性が低く評価されてしまう問題もあるため、なるべく異なる経路を十分に選択する必要がある。そのため、道路リンクの利用回数の制約を設ける方法や経路間の類似度によって経路を間引く方法、限定ネットワークと呼ばれる代表的なリンクで構築されたネットワーク上で探索する方法([中川ら 1996])等が提案されている。しかしながら、本研究では覚知火災による道路閉塞が制約条件として与えられていたため、以上のような制限を設けることで非常に探索しにくいネットワークとなっている。以上の 3 点、①信頼度の高い経路を優先的に選択すること、②なるべく異なる経路を十分に選択すること、③制約の強いネットワーク下でもミニマルパスを確保することが技術的な重要課題となる。本研究では、手法の開発途上であるものの、ある程度、上記の問題を解決する手法を開発した。

第二に、一つのリンクを複数のミニマルパスで重複して利用していることが予想されるため、(58)を X_q について展開したブル演算による確率計算は、多大な計算コストがかかる。これに対する近似的解法として、[若林 1989]によってさまざまな検討が行われている。その中でも代表的なものとして、ミニマルパスとミニマルカットそれぞれによる連結信頼性の近似的評価を行い、採用するミニマルパスおよびミニマルカットの数を増減させ、各値が交わったときの評価値を利用する交点法([飯田ら 1988])、ミニマルパスセット上のリンクに 0 から 1 のランダムな値を与えて信頼度以下なら通過可能、信頼度以上なら通過不可とした実験を繰り返し行い、連結信頼度の確率的評価を行うモンテカルロ法([若林 1989])が知られている。本研究では、通過時刻の制約及び通過時刻によって信頼度が異なる問題から、ミニマルカットの選択が困難であるため、モンテカルロ法による最遅避難確率の評価を行う。

5.5.4 ミニマルパスセットの構築手法

前節でも述べたように、本研究では以下の3つの課題を解決するミニマルパスセットの探索手法が必要である。

- ①信頼度の高い経路を優先的に選択すること
- ②なるべく異なる経路を十分に選択すること
- ③制約の強いネットワーク下でもミニマルパスを確保すること

上記の課題に対して、以下の方針に基づきミニマルパスセットの探索手法を検討する。

- ①P最大経路を探索し避難可能確率が高い経路からミニマルパスセットに採用すること
- ②避難開始地点及び避難場所からの距離が遠い程経路選択の自由度が増えることから、距離に応じた使用コストを設け、第2第3のミニマルパスを探索する際、使用コストが一定値以上のリンクから使用不可とすること
- ③直前の判断時刻に探索したミニマルパスセットを再利用すること

以上の方針を基に、ミニマルパスセットの探索を勧告判断の度に実施し、それよりも過去に構築したミニマルパスセットと合成をすることで、一定本数のミニマルパスセットを保持し続ける手法を開発した。ただし、現在の手法は開発途上の手法であることは否定できず、最遅避難確率を評価するのに十分なミニマルパスセットの構築は保証されていない。しかしながら、本研究の勧告避難の検証にはある程度耐えうる手法であるため、今回は本手法を採用し、更なる改良は今後の課題とする。

a) ミニマルパスセット(Mp_k)の探索

図5-7にk回目の勧告判断時におけるミニマルパスセットの探索フローを示す。使用している記号の説明は、本文の最後に記載するとともに、本文中にかっこ書きで記載しているので参考にされたい。

本研究では、常に一定本数(N_{max})のミニマルパスセットの構築を目指すため、既存のセットに追加する経路数は既存のセット(Mp_{k-1})の不足数($N_{max} - N_{n-1}$)とする。ただし、新しい覚知火災情報に基づいた経路を確保するため、最低本数(N_{min})の探索は必ず実施する。

次に、避難開始時刻に次回の判断時刻を安全避難比で除した時刻($a_s^{-1} * T_{k+1}$) (以下「評価時刻」)を設定し、P最大経路を探索する。探索経路 P_i の使用コスト(後述)を各リンクに加算し、使用コストが1以上のリンクを次の探索時に使用不可にする。

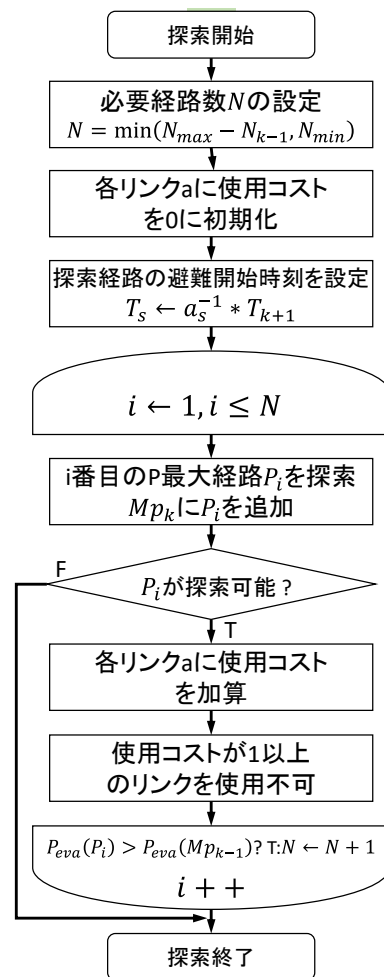


図5-7 k回目の勧告判断時におけるミニマルパスセットの構築フロー

以上の過程を、探索本数 N を満たすまで、若しくは、探索不可になるまで繰り返す。ただし、探索された経路 P_i の避難可能確率($P_{eva}(P_i)$)が過去のミニマルパスセットに含まれる全経路の避難可能確率($P_{eva}(Mp_{k-1})$)よりも高い場合探索本数を1本増加することで、多くの新しい経路を採用するように工夫した。

【図 5-7 中の記号】

N : ミニマルパスの探索本数

N_{max} : 最遅避難確率の推定に必要なミニマルパスの必要本数(定数)

N_{min} : 各勧告判断時に探索するミニマルパスの最低本数(定数)

N_{k-1} : k 回目の判断時に残存する $k-1$ 回目の勧告判断時におけるミニマルパスセット

Mp_k : k 回目の勧告判断におけるミニマルパスセット

T_s : 探索するミニマルパスの避難開始時刻 [h]

T_{k+1} : $k+1$ 回目の勧告判断時刻 [h]

P_i : i 番目に探索したミニマルパス

$P_{eva}(P_i)$: P_i の避難可能確率,

$P_{eva}(Mp_{k-1})$: Mp_{k-1} に含まれる経路における避難可能確率の最大値

b) リンクの使用コスト

リンクの使用コストは、ミニマルパスセットを類似した経路で構成されることを防ぐためにリンク別に使用回数を制限することを目的として、ミニマルパスセットを構築する際、ミニマルパスを1経路探索する度に各リンクに加算するコストである。頻繁に利用されると考えられる避難開始地点及び避難場所に近いリンクほど使用可能回数が増えるように、ミニマルパス上の使用可能回数を決定し、その逆数を各リンクへ加算する使用コストとする。図 5-8 に各リンクにおける使用可能回数の模式図を示す。

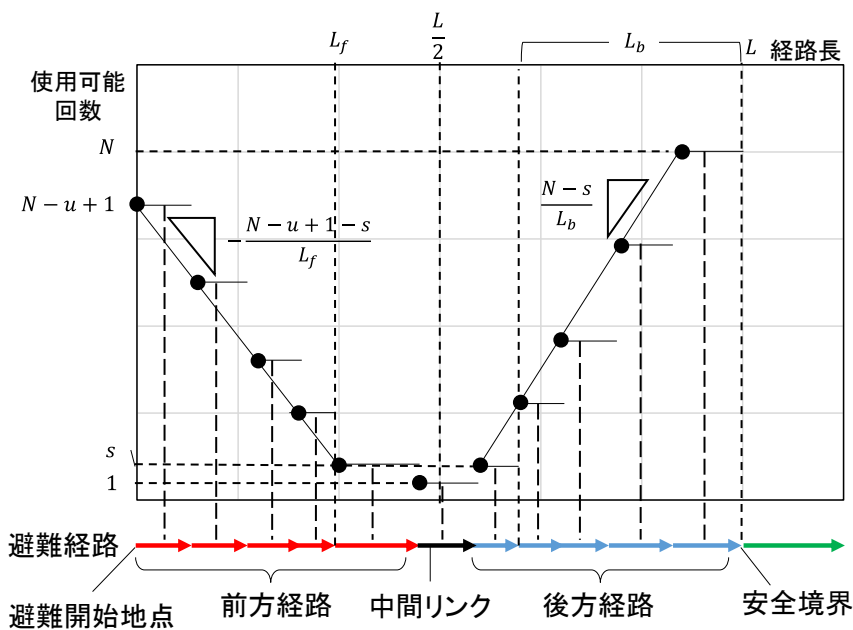


図 5-8 ミニマルパスセット探索における各リンクの使用可能回数

本研究では、避難経路上の中間点となる点が存在するリンクを基準に、避難開始地点側を前方経路、避難場所側を後方経路と定義し、避難開始地点もしくは安全境界から中間リンクまでの経路長さに比例して使用可能回数を設定する。中間リンクの使用回数は1回とし、中間リンクが重複しないミニマルパスセットを構築する。ただし、避難開始地点に接続するリンクは全て1回以上使用することを条件としている。この時、中間リンクに隣接する経路の使用可能回数を s に対して、リンク a の使用コスト $C(a)$ は(60)で評価する。

$$C(a) = \begin{cases} = 1 & a \text{ が中間リンク} \\ = (-\{(N - u + 1 - s) * L_{s,a}/L_f\} + N - u + 1)^{-1} & a \text{ が前方経路上} \\ = (-\{(N - s) * L_{a,e}/L_b\} + N)^{-1} & a \text{ が後方経路上} \end{cases} \quad (60)$$

N : ミニマルパスの探索本数

u : 避難開始地点に接続するリンク数

s : 中間リンクに隣接するリンクに許す使用回数 (本研究では2回を設定する)

L_f : 前方経路の経路長 — 前方経路における最後リンクのリンク長 [m]

L_b : 後方経路の経路長 — 後方経路における最前リンクのリンク長 [m]

$L_{s,a}$: 避難開始地点から前方経路におけるリンク a の始点までの経路長 [m]

$L_{a,e}$: 後方経路におけるリンク a の終点から安全境界までの経路長 [m]

エラー! 参照元が見つかりません。

c) ミニマルパスセットの更新

a) のミニマルパスセットの構築時において、覚知火災の延焼拡大による道路閉塞時刻の制約の下では、火災の間に存在する特定のリンクに依存するミニマルパスが多くなる。そのため、使用コストによってリンクの使用制限をすることで、本来存在するはずのミニマルパスが発見されにくくなる。そのため、ある勧告判断時に探索した経路のみでは十分なミニマルパスを得にくく、最遅避難確率を十分に評価することが難しくなる。本研究では、根本的にこの問題の解決には至らなかったが、勧告避難を決定するまでの各判断時刻で求めたミニマルパスセットを蓄積することで、なるべく多くのミニマルパスを確保することとした。

図 5-9 に、勧告避難の決定判断におけるミニマルパスセットの更新フローを示す。まず、初期のセット (Mp_0) として地震発生時に火災による道路閉塞が無い状態で、必要本数だけミニマルパスを探索する。この段階では、概ね必要本数を満たすことができる。判断時刻の度に、直前の判断時刻で求めたミニマルパスセット Mp_{k-1} の各ミニマルパスについて、現在の判断時刻において経路が通過可能か判断を行い、通過不能であればセットから除き、通過可能であれば、現在の判断時刻・評価時刻に設定した避難開始時刻より避難可能確率を再計算する。その後、a) のミニマルパスセットの探索手法に基づき、ミニマルパスセット (Mp_k) を構築し、 Mp_k に Mp_{k-1} を加える。ただし、加える経路数は必要本数を満たすまでとし、 Mp_k に含まれる経路以外の経路について避難可能確率が高い順に加える。このミニマルセットパスを用いて、次節で紹介するモンテカルロ法によって最遅避難確率 (p_l) を求め、最遅避難閾確率と比較して勧告判断を行う。避難勧告を見送る場合、 Mp_k を次の判断時刻に持ち越し、勧告避難を決定するまで繰り返す。

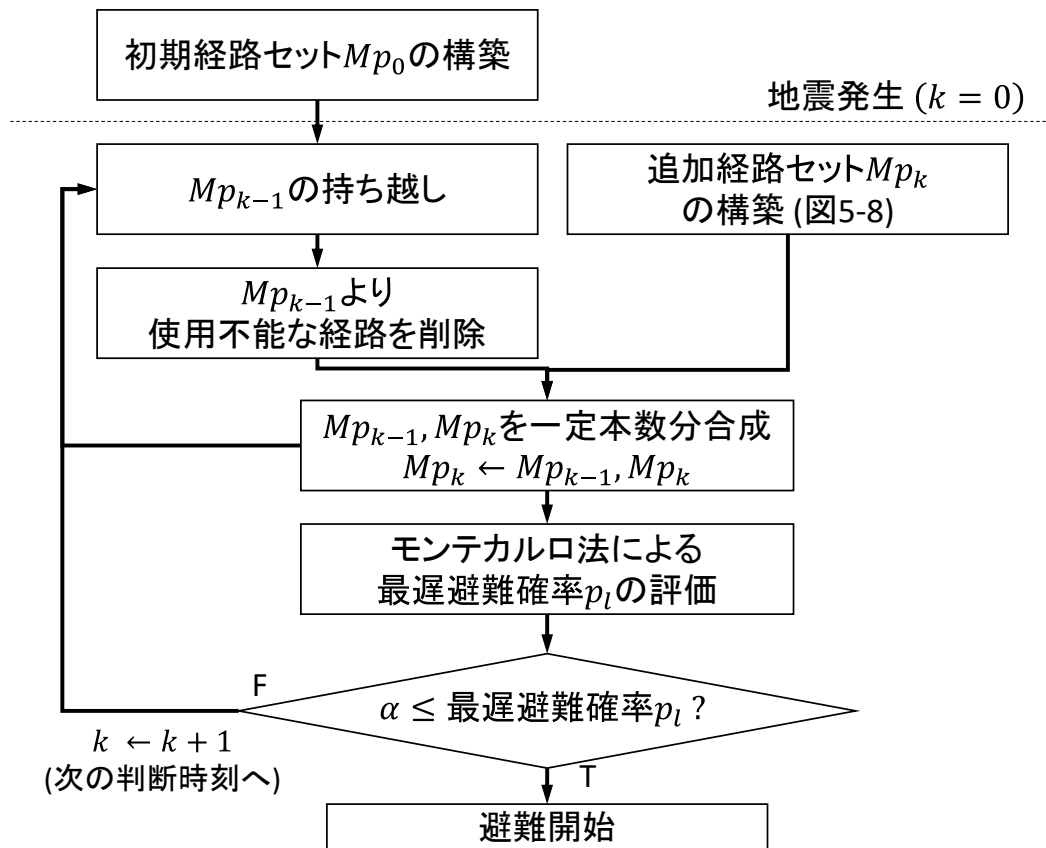


図 5-9 勧告避難の決定判断におけるミニマルパスセットの更新フロー

5.5.5 モンテカルロ法による最遅避難確率の評価手法

連結信頼性の評価方法において、モンテカルロ法による手法が高精度に評価できることが知られている([若林 1989])。モンテカルロ法による連結信頼性の評価とは、各道路リンクに 0 から 1 のランダムな値を振り、各リンクの信頼性がこの値よりも低い場合に閉塞するという閉塞判定シミュレーションを繰り返し実施し、途絶しないミニマルパスが 1 つ以上存在する頻度を集計することで連結信頼性を評価する手法である。本研究では、最遅避難時刻である確率を評価するため全経路が途絶する頻度を集計することになる。先行研究と異なる点は、異なるミニマルパス上の同一のリンクは、通過時刻が異なれば信頼性(避難可能確率)が異なる点である。この点に配慮し、モンテカルロ法による最遅避難確率の評価手法を検討した。

図 5-10 に最遅避難確率の推定フローを示す。最遅避難確率の推定は、①準備：各リンクにおける信頼性の設定、②道路閉塞シミュレーションの反復実験、③頻度確率による最遅避難確率の評価の順で行われる。

a)準備：各リンクにおける信頼性の設定

準備段階として、ミニマルパスセット(Mp)を構成する各経路について、経路上のリンクに避難可能確率を付与する。これが、本研究における各リンクの信頼性である。避難可能確率は、勧告判断を実施している時刻を判断時刻とし、最遅避難確率を評価する時刻にリンクの始点までの移動時間を足した時刻を避難開始時刻に設定して避難可能確率((10))を計算する。

b) 道路閉塞シミュレーション

ミニマルパスセットに含まれる各リンクについて、0 から 1 のランダムな値(x_a)を付与する。その後、ミニマルパスセットを構成する各経路について、リンクの閉塞判定を行う。閉塞判定は(61)にて行う。

$$\delta_{a,s} := \begin{cases} 1 & x_a \leq r_{a,s} \\ 0 & x_a > r_{a,s} \end{cases} \quad (61)$$

$\delta_{a,s}$: s 番目のミニマルパスについて道路リンク a が閉塞していないなら 1, 閉塞しているなら 0

その後(62)によって、全経路の途絶可能性を評価する。

$$\delta_{c,i} = \prod_{s=1}^M \left(1 - \prod_{a \in P_s} \delta_{a,s} \right) \quad (62)$$

$\delta_{c,i}$: 全ての経路が途絶している場合 1, 一つ以上途絶していない場合 0

P_s : s 番目のミニマルパス

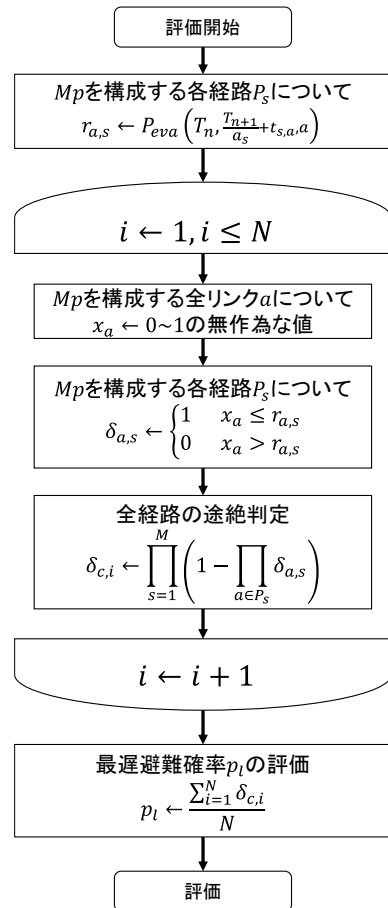


図 5-10 モンテカルロ法による最遅避難確率の推定フロー

c) 最遅避難確率の評価

道路閉塞シミュレーションの反復実験を行った結果に基づき、最遅避難確率を評価する。最遅避難確率は、全試行回数のうち、全経路が途絶された回数を集計し、その比によって評価する。本研究における反復回数は十分に値が収束する 4000 回とした。

$$p_l = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{c,i}}{N} \quad (63)$$

5.5.6 勧告避難に期待される避難開始時期の特徴

図 5-11 に勧告避難の決定判断によって得られた避難開始時刻に期待できる最遅避難時刻比の特徴の模式図を示す。勧告避難では、覚知火災情報に基づく道路ネットワークの閉塞状況に合わせて逐次的に避難開始時刻を決定するため、最遅避難時刻比の分散は小さくなると考えられる。事前計画避難では固定した避難開始時刻が、その時々火災状況に対して早すぎたり遅すぎたりする可能性が考えられるが、覚知火災の状況に合わせる勧告避難では、覚知確率が高くなるほど安全避難比付近での避難の確実性が高くなると期待できる。

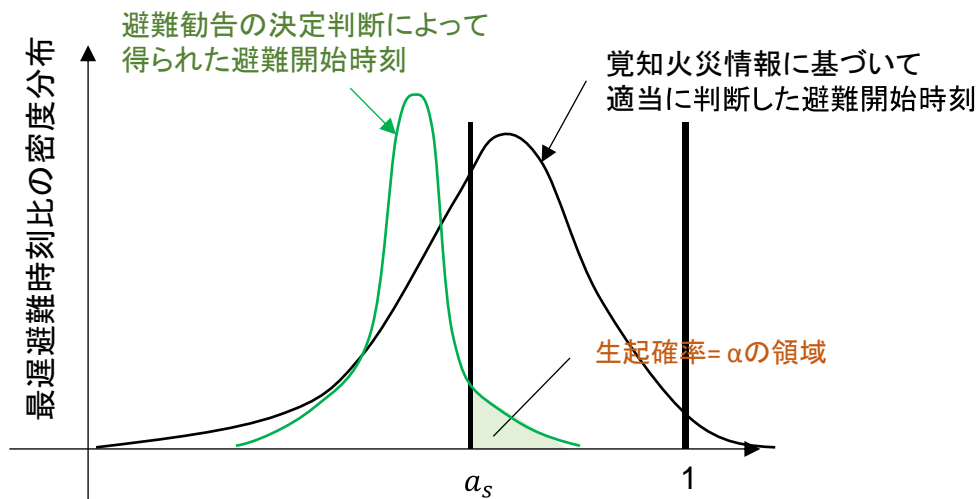


図 5-11 勧告避難による避難開始時刻に期待できる最遅避難時刻比の特徴

5.6 許容リスクに基づく避難開始時刻の遅延化

5.6.1 避難開始時刻を遅延化する意義

地震火災時の避難対策として、突発的に発生した地震直後に避難するのではなく、初期消火・救助活動等の住民による自助共助活動や個人の財産保全、一斉避難による混雑防止のために十分な時間(以下、準備時間)の確保が必要とされている([建設省建築研究所 1989]). 特に、初期消火活動は、出火点を減少させ、火災による物的被害の軽減・最遅避難時刻の延長による時間確保に繋がるため非常に重要である。したがって、避難開始時刻をなるべく遅い時刻に設定することが必要である。このように準備時間をなるべく確保しつつ、かつ、安全に避難することが可能な見切り時刻の設定が不可欠である。その見切り時刻の設定方法として、最遅避難理論が有効であると考えられる。

しかし、最遅避難理論は全ての火災を覚知し正確に延焼が可能な完全情報下を前提しているモデルであり、実際には、リアルタイムでの正確な最遅避難時間の予測は困難である。また、最遅避難における経路は、残存する最後の経路である可能性が高いため、前述の自由避難理論のように、自由な避難経路の変更や避難の遅れに対して非常にリスクが高いと考えられる。そこで、本研究の避難開始時刻決定モデルを用いて最遅避難理論に代わる避難開始時刻の遅延化について検討する。

5.6.2 許容リスクを所与とした避難開始時刻の遅延化

本研究の事前計画避難及び勧告避難を応用し、避難開始時刻の遅延化を行う方法を検討する。本研究では、事前計画避難もしくは勧告避難の最も早い方で避難を行う。したがって、片方の最遅避難閾確率を低くすれば、もう片方による避難開始タイミングに従うことはなく、早期に避難が開始される。本研究では、こうした最遅避難閾確率 α 、 β の組み合わせを調整し、避難開始時刻が最も遅くなる組み合わせを探索する。

図 5-12 に避難開始時刻決定の流れを示す。まず、事前評価として、最遅避難時刻の確率分布及び最遅避難時刻比に対する避難リスクの関係をテーブル関数化する。この時、対象とするパラメータ・避難規範別に全ケース実施する必要がある。次に、最遅避難時刻比に対する避難リスクのテーブル関数から許容リスクを満たす最遅避難時刻比を取り出し、これを安全避難比とする。取り出した安全避難比に対して、 α 、 β のあらゆる組み合わせに対してリアルタイム避難誘導のモンテカルロシミュレーションを実施する。許容リスクを満たす α 、 β の組み合わせを整理し、その中から避難開始時刻の期待値が最も遅い組み合わせを採用する。

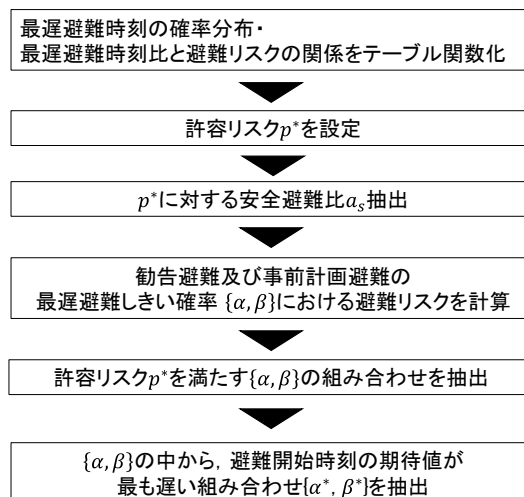


図 5-12 避難開始時刻決定の流れ

5.7 小括

本章では、避難開始時刻の見逃しを防ぐための避難開始時刻決定モデルについて検討した。まず、前章までの避難誘導シナリオについて、切迫避難、事前計画避難及び勧告避難によって避難開始時刻の逐次変更に関するシナリオを加えた。次に、火災遭遇後の避難誘導に頼らずに局所的な火災のみを避ける最短経路によって避難を継続する自由避難モデルを構築し、避難場所への到達可能性によって避難誘導の頑健性を定義した。以上のシナリオの下、最遅避難時刻に対する相対的な時刻によって避難開始時刻を評価し安全避難開始時刻を設定すること、この安全避難開始時刻を見逃さないために、最遅避難時刻に事前評価に基づく事前計画避難、覚知火災情報を活用した連結信頼性評価に基づく勧告避難によって避難開始時刻を決定する方針を示した。

次に、以上の方針について具体的に定式化を行った。第一に、最遅避難時刻に対する避難開始時刻を最遅避難時刻比として定義し、避難成功率がある値(許容リスク)を越えるときの最遅避難時刻比を安全避難比として設定することとした。また、出火パターン(出火点の位置と出火時刻の組み合わせ)による避難の困難性の違いを指摘し、避難者にとって前方が開けた下側避難と火災を横切るような避難が強いられる上側避難の2つに分類する方法を示し、上側避難に合わせた安全避難開始時刻の設定の重要性を述べた。第二に、事前計画避難について、最遅避難時刻の確率分布に関する事前評価に行い、最遅避難閾確率よりも低い頻度で生じる最遅避難時刻の最大値に対して、安全避難比を乗じた時刻で避難開始時刻を設定する方法を示した。第三に、連結信頼性と最遅避難時刻の関係性を示し、リアルタイムのある時刻において最遅避難時刻である確率(最遅避難確率)を評価する手法を開発するとともに、その確率が最遅避難閾確率を上回る時刻に避難勧告の決定判断を行う方法を示した。最後に、地震火災時に避難開始までの猶予時間を確保することの必要性を示し、以上の事前計画避難及び勧告避難を応用した上で、許容リスクを満たすように避難開始時刻を遅延化する手法について示した。

地震火災時の最遅避難時刻のふるまい等、解析的に解くことができない値について、シミュレーション実験に基づくテーブル関数を利用する方法を採用した。広く一般的に本研究を応用する場合、こうしたテーブル関数を用いた値について、そのメカニズムや予測・推定手法について検討する必要がある、今後の課題とした。

次章では、本章で構築した避難開始時刻決定モデルによる避難誘導の頑健化を検証するために、第4章で構築したリアルタイム避難誘導シミュレーションを自由避難および避難開始時刻の逐次変更による拡張を行い、格子状市街地を対象として避難場所への到達可能性に基づく評価検証を行う。

第6章

避難開始時期決定モデルによる見逃しリスク低減 効果の検証

第6章 避難開始時期決定モデルによる見逃しリスク低減効果の検証

6.1 本章の目的と構成

本章では、格子状市街地を対象として避難開始時期決定モデルを適用したリアルタイム避難誘導シミュレーションを実施し、本モデルによる見逃しリスク低減効果の検証を行う。はじめに、第5章で構築した自由避難による避難継続及び逐次的な避難開始時刻の変更が行えるように、第3章で開発したリアルタイム避難誘導シミュレーションを拡張する。その後、拡張された新しいリアルタイム避難誘導シミュレーションを応用し、避難開始時期決定モデルで得られる避難開始時刻についてその特徴を分析する。本研究では、許容リスクを満たすように結果を得るため、避難開始時刻の大小、避難誘導を適用しない場合(切迫避難のみ)の避難成功率との比較をもって効果の検証を行う。

本章の構成は以下のとおりである。

6.2節において、第3章で構築した避難誘導シミュレーションを基に、火災遭遇後も誘導経路に頼らずに避難を継続させる自由避難モデルと避難開始時期の逐次変更を考慮した拡張を行う。

6.3節では、モンテカルロ法によって見逃しリスクを評価する指標を紹介する。まず、避難リスクに対する安全性として、避難場所の到達可能性を評価する避難成功率を定義する。避難開始時刻の評価として、最遅避難時刻比の確率分布と安全避難比の超過率、避難開始時刻の分位数を定義する。

格子状市街地を対象として、避難開始時期決定モデルの見逃しリスク低減効果を検証する。まず、6.4節において、実験の条件を示す。本研究では、地震火災のパラメータと避難のパラメータに対するモデルの感度を評価するに際し、各パラメータに関する基準条件(地震火災基本ケース・避難基本ケース)を設定し、各ケースよりパラメータを変化させて分析を行う。次に、避難開始時刻決定モデルの事前評価に関する検証として、事前計画避難のための最遅避難時刻の確率分布の評価(6.5節)、避難開始時刻の目標設定のための安全避難比の評価(6.6節)を行う。その後、6.7節では、事前計画避難および勧告避難によって定まる最遅避難時刻比の度数分布および安全超過率より、各避難方針の特徴を示す。最後に、6.8節において、許容リスクを満たす避難開始時刻の遅延化について、事前計画避難及び勧告避難の結果を二次平面上に可視化し、その結果に基づき、遅延化された避難開始時刻を評価する。

6.2 自由避難によるリアルタイム避難誘導シミュレーションの拡張

本節では、避難開始時期決定モデルによる見逃しリスクの評価を行うことを目的として、第3章で構築した避難誘導シミュレーションの拡張を行う。

6.2.1 自由避難モデル

第3章では、火災への遭遇によって避難誘導の頑健性を定義していたため、火災遭遇後の避難継続を想定していなかった。そこで、火災遭遇後において、自由避難に切り替えて避難行動を継続するように変更した。なお、切迫避難の開始時における避難開始地点への火災接近は火災への遭遇とはみなさず、切迫避難の開始時の避難経路は動的誘導経路とし、避難開始後、初めて火災に遭遇した場合に自由避難を実施する。また、避難成功の条件も、計算終了時に、避難者の位地が避難場所に到達しているか否かで判断するようにした。

6.2.2 火災状況に合わせた避難開始時期の変更

第3章では、シミュレーションの開始時に避難者の避難開始時刻に定数を指定している。本研究では、火災の接近及び勧告避難の決定判断によって避難開始時刻を逐次的に変更するようになる必要がある。

a) 火災の接近による避難開始時刻(切迫避難)

火災の接近による避難開始時刻は、避難開始地点に延焼が到達する時刻、避難開始地点と隣接する各道路リンクの閉塞時刻のうち、最も早い時刻とし、(64)で決定する。

$$\text{切迫避難時刻: } T_m = \min_j \left(T_{b,s,j} - \frac{l_{s,f}}{v_w} \right) \quad (64)$$

$T_{b,s,j}$: $s \neq j$ の時、避難開始地点から最寄りノード j への道路リンクの通過不能時刻 [h]
 $s = j$ の時、避難開始地点への延焼到達時刻 [h]

$l_{s,f}$: 避難開始地点から閉塞箇所までの距離 [m]

v_w : 歩行速度 [m/h]

避難者の初期化において、(65)のように事前計画避難と切迫避難の避難開始時刻のうち早い方を避難開始時刻に設定することで、切迫避難を反映させる。

$$\text{避難開始時刻: } T_s = \min(T_m, T_c) \quad (65)$$

T_m : 切迫避難の避難開始時刻 [h]

T_c : 事前計画避難の避難開始時刻 [h]

b) 勧告避難の決定判断による避難開始時刻の逐次変更

勧告避難の決定判断は、覚知火災情報の更新に合わせて逐次行われる。第5章で示した手法で勧告避難の決定判断に対して避難勧告を下した場合($\alpha \leq p_l$)、避難者が避難開始前であれば、避難勧告を下した時刻を避難開始時刻に代入する。

6.2.3 避難誘導シミュレーションの流れ

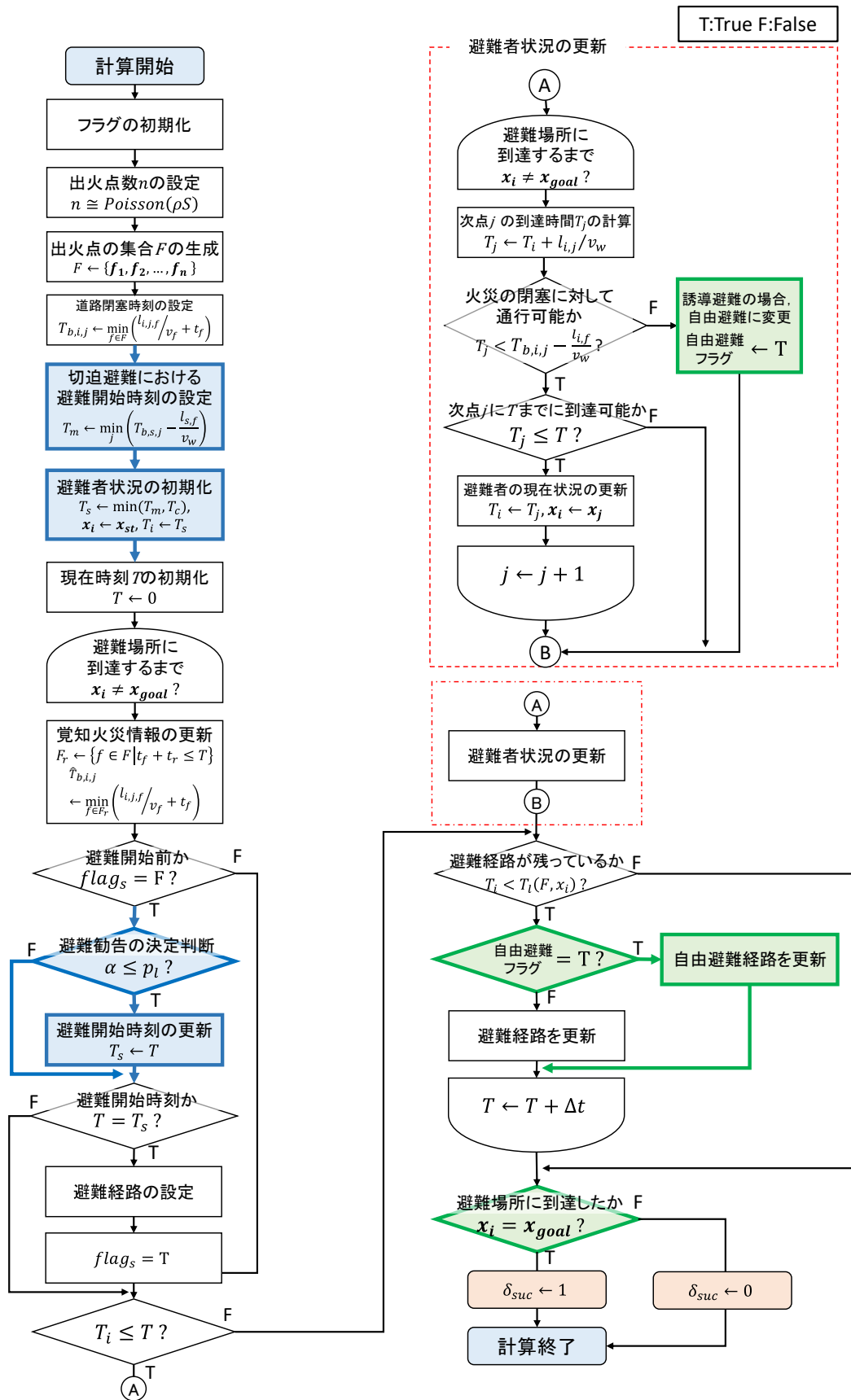
図 6-1 に、火災遭遇後の自由避難と避難開始時刻の逐次変更を反映した避難誘導シミュレーションのフローチャートを示す。なお、本フローチャートは、図 3-3 を基に作成しており、火災遭遇後の自由避難(緑太枠・緑塗)及び避難開始時刻の逐次変更(青太枠・青塗)を考慮している。

表 6-1 に、避難誘導規範の項目を示す。本シミュレーションでは、避難開始時刻を決定するためのパラメータ(許容リスク・最遅避難閾確率)と避難開始後に従う避難経路を設定する必要がある。ここで、自由避難は、避難開始と同時に避難誘導の避難経路に従わずに、自由意思の経路で移動することを意味する。

表 6-1 避難誘導規範

規範カテゴリ	項目	定義
避難開始時期	許容リスク	目標とする安全避難開始時刻に対する許容リスク
	事前計画避難の最遅避難閾確率	事前計画避難の避難開始時刻を決定するための最遅避難時刻の累積確率の閾値 1.0 の場合、事前計画避難を実施しない。
	勧告避難の最遅避難閾確率	勧告避難の決定判断を下す最遅避難確率の閾値 1.0 の場合、勧告避難を実施しない
避難経路	選択経路	覚知火災情報に基づいた避難経路の選択方法 (自由避難, 最短経路, 最遅避難経路, P 最大経路, 最大余裕経路 M*-P 最大経路)
	必要余裕性	M*-P 最大経路において確保すべき避難余裕性
	動的更新の有無	避難途上で動的更新する・しない

6.2 自由避難によるリアルタイム避難誘導シミュレーションの拡張



緑太枠・緑塗：火災遭遇後の自由避難の考慮 青太枠・青塗：避難開始時刻の逐次変更の考慮

図 6-1 自由避難・避難開始時刻の逐次変更を反映した避難誘導シミュレーションの流れ

6.3 モンテカルロ法による避難誘導効果の評価指標

前節で示したリアルタイム避難誘導シミュレーションを複数回実行し、その平均像をモンテカルロ法によって評価する。

6.3.1 避難成功率

本章では、避難誘導の頑健性を火災遭遇後の有無にかかわらず避難場所に到達できる可能性まで拡張したため、本研究では(66)に示す避難成功率を評価する。

$$\text{避難成功率} := \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{suc,i}}{N} \quad (66)$$

$\delta_{suc,i}$: 避難場所に到達した場合 1, 到達しなかった場合 0

N : 試行回数

下添え字の i : 試行番号

6.3.2 最遅避難時刻比

避難開始時期の見逃しリスクに対する安全性指標として、最遅避難時刻比及び安全比超過率を定義する。最遅避難時刻比は、最遅避難時刻に対する避難開始時刻の比であり、(67)で表される。

$$\text{最遅避難時刻比 } a_i := \frac{T_{s,i}}{T_{l,i}} \quad (67)$$

$T_{s,i}$: i 番目の試行における避難開始時刻 [h]

$T_{l,i}$: i 番目の試行における最遅避難時刻 [h]

下添え字の i : 試行番号

最遅避難時刻比は最遅避難時刻に対してどの程度早く避難開始するのかを表した指標である。最遅避難時刻比が小さいほど、最遅避難時刻に対して早く避難開始しており、避難が困難となる時期を見逃さずに安全な避難が可能となることが考えられる。本研究では、最遅避難時刻比の分布より、避難開始時刻決定モデルを評価する。

特に、5.3.3 で定義した安全避難比に対して、より大きな最遅避難時刻比で避難した試行数を集計し、試行回数に対する比(68)として、安全避難比の超過率を評価する。

$$\text{安全避難比の超過率} := \frac{\sum_{i=1}^N \delta_{a,i}}{N} \quad (68)$$

$$\delta_{a,i} = \begin{cases} 1 & (a_i > a_s) \\ 0 & (a_i \leq a_s) \end{cases}$$

a_i : i 番目の試行における最遅避難時刻比

a_s : 安全避難比

特に、 a_s が 1.0 の時には最遅避難時刻よりも遅い避難開始の可能性を表しており、重要な値であると考えられる。

6.3.3 避難開始時刻

本研究では、避難開始時刻の遅延化効果を評価するために、各シミュレーションによって得られた避難開始時刻の平均像を評価する必要がある。本研究の避難誘導シミュレーションには、避難を実施しないケース(切迫避難で火災がいつまでも迫らない場合、避難開始を待たずに避難不能に陥った場合)が存在する。こうした場合の避難開始時刻は十分大きな値(99999999)で定義しているため、期待値による評価が望ましくない。そこで、本研究では避難開始時刻の中央値(69)を用いて平均像を評価する。

$$\text{難開始時刻の中央値(50パーセンタイル値)} := \begin{cases} T_{s,k} & k \in \mathbb{N} \\ \frac{T_{s,[k]} + T_{s,[k]}}{2} & k \notin \mathbb{N} \end{cases} \quad (69)$$

$$k = \frac{50}{100} * N$$

$[k]$: k を越えない最大の整数

$[k]$: k を越える最小の整数

$T_{s,k}$: 全サンプルを昇順にソートしたときの k 番目の値

6.4 実験の概要

6.4.1 実験目的

本章では、本研究の避難開始時刻決定モデルによって設定される避難開始時刻(最遅避難時刻比)が最遅避難閾確率に従って決定されているのかの検証とその特徴及び避難開始時刻の遅延化効果について、第3章エラー! 参照元が見つかりません。の格子状市街地を対象として検証する。

まず、リアルタイム避難誘導の事前計画避難のための最遅避難時刻の確率分布及び最遅避難時刻比に対する避難成功率の関係についてモンテカルロ法による分析を行う。また、本分析結果より最遅避難時刻及び安全避難比に関するテーブル関数化を行った上で、避難誘導シミュレーション実験を行い、モンテカルロ法によって事前計画避難及び勧告避難の最遅避難時刻比の特徴について分析する。最後に、事前計画避難、勧告避難及びこれらを組み合わせた避難(以下「リアルタイム避難」)について、避難開始時刻の遅延化効果の評価を行う。

6.4.2 実験条件

本章においても、第3章と同様にパラメータによる違いに関する比較を行うが、シミュレーションの行程が多いこと・実験時間の関係より、基本ケースを設定し、その基本ケースから1つのパラメータを変化させて比較を行う。本論では、基本的な比較実験を行い詳細な分析は今後の課題とする。

表6-2に実験ケースとそのパラメータ値を示す。本研究では、地震火災シミュレーションの基準となるケース(地震火災基本ケース, Case-2)とその他の避難者に関わるパラメータ(避難基本ケース, Case-7)を基準として、避難場所からの距離(x_s)、期待出火件数密度(ρ)、延焼速度(v_f)、覚知確率(r)、歩行速度(v_w)の違いによる特徴の比較を行う。

まず、基本ケースについて説明する。地震火災基本ケース (Case-2) は地震火災の甚大さに関わる比較を実施するため、期待出火件数密度及び延焼速度それぞれの影響が大きくなり過ぎることで、違いの比較が不可能になることを防ぐために、平均的な地震火災像を想定し、かつ、避難誘導効果が地震火災の甚大さに対して影響が小さくなり過ぎない程度の避難行動・覚知情報像を設定した。一方、(避難基本ケース Case-7)は、避難行動や避難誘導の性能に関わる比較検討するため、より深刻な状況でも機能することが保証された比較であることを目的として、甚大な火災状況・低い覚知確率を設定した。

試行回数は計算結果がモンテカルロ法に耐えうる程度のサンプルを確保と計算時間の制約のバランスを考え、最遅避難時刻の確率分布は15000回、安全避難比の推定は3000回、避難誘導の検証は2000回実行した。安全避難比の推定や避難誘導の検証において、計算時間の都合上、1%や5%の許容リスクに対してやや少なめの試行回数であり、これによるばらつき誤差が含まれた結果であることは留意したい。

表 6-2 実験ケースとパラメータ

Case-No	パラメータ (記号の定義は, 表 3-1 を参照)						
	市街地モデル		地震火災 シミュレーション		覚知情報 シミュレーション		避難行動 シミュレーション
	対象圏域	x_s	ρ [件/m ²]	v_f [m/h]	r	Δt [h]	v_w [m/h]
Case-1	格子	3000m 地点	1.5×10 ⁻⁶	60	0.7	0.1	2000
Case-2	格子	3000m 地点	3.0×10⁻⁶	60	0.7	0.1	2000
Case-3	格子	3000m 地点	4.0×10 ⁻⁶	60	0.7	0.1	2000
Case-4	格子	3000m 地点	3.0×10 ⁻⁶	30	0.7	0.1	2000
Case-5	格子	3000m 地点	3.0×10 ⁻⁶	100	0.7	0.1	2000
Case-6	格子	3000m 地点	4.0×10 ⁻⁶	100	0.5	0.1	1000
Case-7	格子	3000m 地点	4.0×10⁻⁶	100	0.5	0.1	2000
Case-8	格子	3000m 地点	4.0×10 ⁻⁶	100	0.5	0.1	4000
Case-9	格子	1000m 地点	4.0×10 ⁻⁶	100	0.5	0.1	2000
Case-10	格子	2000m 地点	4.0×10 ⁻⁶	100	0.5	0.1	2000
Case-11	格子	3000m 地点	4.0×10 ⁻⁶	100	0.6	0.1	2000
Case-12	格子	3000m 地点	4.0×10 ⁻⁶	100	0.7	0.1	2000
Case-13	格子	3000m 地点	4.0×10 ⁻⁶	100	0.8	0.1	2000
Case-14	格子	3000m 地点	4.0×10 ⁻⁶	100	0.9	0.1	2000
Case-15	格子	3000m 地点	4.0×10 ⁻⁶	100	1.0	0.1	2000

太字：基本ケース(地震火災:Case-2, 市街地覚知情報・避難行動: Case-7)

赤字：比較対象のパラメータ

6.5 事前計画避難のための最遅避難時刻の事前評価

本節では、実験対象のケースについて、事前計画避難に利用する最遅避難時刻の確率分布の関する事前評価を行った結果を示す。リアルタイム避難誘導において、如何に最適に避難開始時刻を決定したとしても、最遅避難時刻よりも遅い分布は得られない。すなわち、最遅避難時刻は、以降のリアルタイム避難誘導で決定される避難開始時刻の上界(最遅避難時刻の避難は危険であるため、上限ではない)に存在する時刻である。事前評価として最遅避難時刻を把握しておくことは、リアルタイム避難誘導の技術的な準備だけでなく、避難誘導の限界を把握しておく上でも重要である。

本研究では、本結果をテーブル関数化しておくことで、リアルタイム避難誘導における避難開始時刻決定の時に呼び出して利用する。

なお、本分布は市街地全域の分布ではなく、各実験ケースで対象としている避難開始地点に対して、あらゆる出火パターンによる最遅避難時刻の計算を行った結果であることに留意したい。

6.5.1 基本ケースの分析

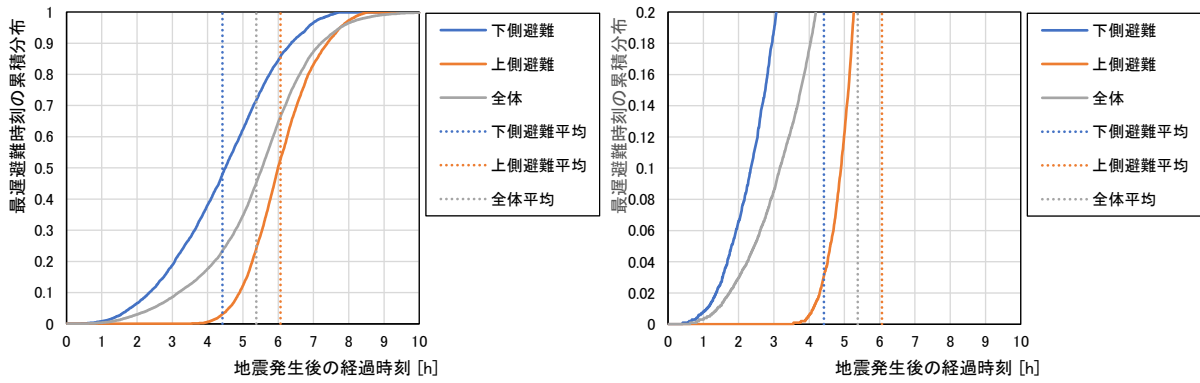
図 6-2・図 6-3 に、地震火災基本ケース及び避難基本ケースの最遅避難時刻の累積分布を示す。下側避難と上側避難というように出火パターンに対する避難リスクの構造を大雑把に 2 つに分けたが、最遅避難時刻分布の明確な違いが確認できた。

下側避難では、地震発生後直後から最遅避難時刻の存在が確認できる。これは、道路ネットワークの途絶を待たずに避難開始地点付近が避難きっかけになるためである。下側避難の場合、避難開始地点を中心とした円上に出火点が存在すると、その半径分の延焼が到達する時間が最遅避難時刻となる。時間経過に伴いこうした円が広がり、その面積に依じて最遅避難時刻を迎える可能性が高くなる。そのため、地震発生直後から緩やかに最遅避難時刻を迎える頻度が上昇する傾向がみられる。

他方、上側避難では地震発生後、暫くは最遅避難時刻が存在せず、地震火災基本ケースでは約 4 時間後、避難基本ケースでは約 2 時間後に最遅避難時刻を迎え始め、急なカーブを描いている。道路ネットワークの中で、避難開始地点と避難場所の接続が途絶されるには一定の時間を要し、ある時期を境に急激に断絶されやすくなることを意味している。地震発生から十分な時間が経過しているため、多くの経路が途絶している中で最遅避難時刻を迎えることになり、より限られた経路の中避難を強いられる可能性が考えられる。

以上のように、下側避難と上側避難において、最遅避難時刻という観点のみでもその避難リスク構造は大きく異なることが示唆された。

6.5 事前計画避難のための最遅避難時刻の事前評価

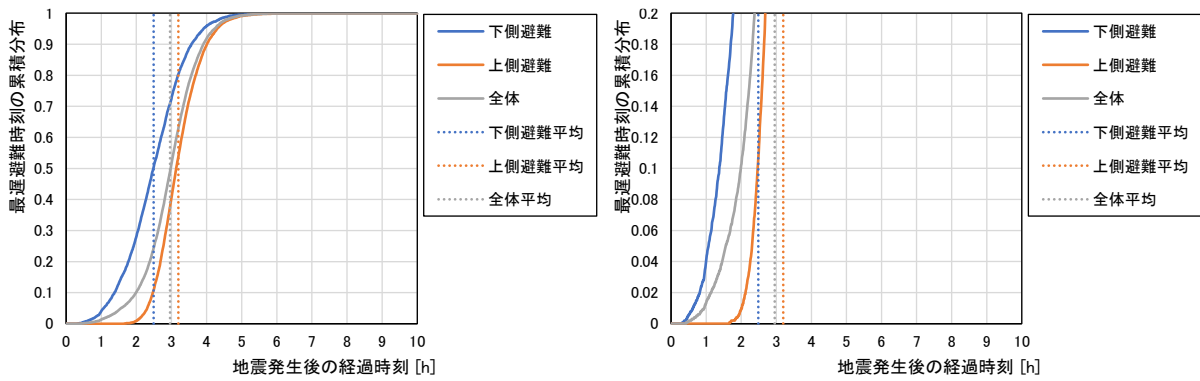


(a)全体

(b)累積分布が 0.2 以下にフォーカス

対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 3.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 60 [\text{m}/\text{h}]$, $v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}]$

図 6-2 地震火災基本ケース (Case-2) における最遅避難時刻の累積分布



(a)全体

(b)累積分布が 0.2 以下にフォーカス

対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 4.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 100 [\text{m}/\text{h}]$, $v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}]$

図 6-3 避難基本ケース (Case-7) における最遅避難時刻の累積分布

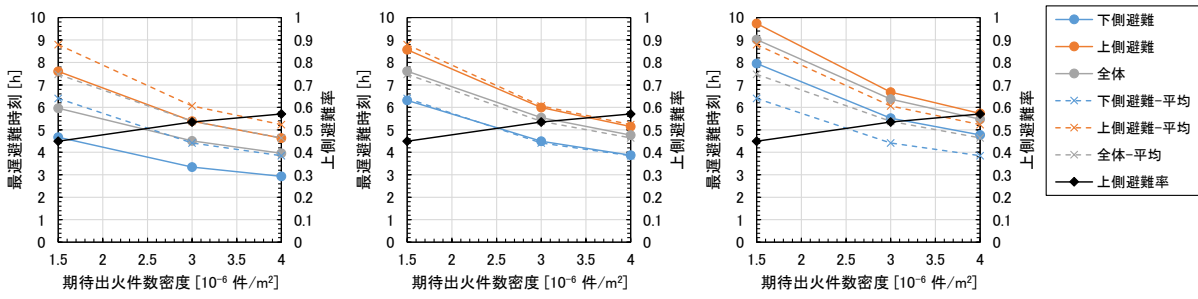
6.5.2 各パラメータと最遅避難時刻の関係

次に、地震火災及び避難のパラメータと最遅避難時刻の平均値の関係について観察する。

a) 地震火災：期待出火件数密度・延焼速度

図 6-4・図 6-5 に地震火災基本ケース(Case-2)を基準として、期待出火件数密度及び延焼速度を変化させたときの最遅避難時刻の推移を示す。期待出火件数密度及び延焼速度が大きいほど、最遅避難時刻は早くなる傾向がみられる。期待出火件数密度や延焼速度が小さい段階では、最遅避難時刻は 50% タイルで 8 時間から 10 時間と比較的遅い時刻であり、出火や延焼を抑制することの重要性が示唆される。

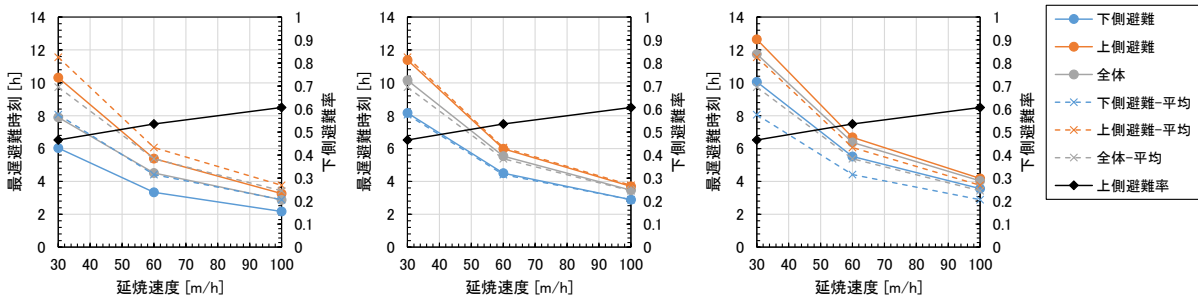
期待出火件数密度や延焼速度の増大と共に、上側避難率(全サンプル数のうち上側避難のサンプルの比率)は増加しているものの、非常に緩やかである。これは、期待出火件数密度や延焼速度の増大によってネットワークの途絶が加速すると同時に、避難者周辺に火災が迫る可能性も増加するためであると考えられる。



(a)25 パーセンタイル値 (b)50 パーセンタイル値 (c)75 パーセンタイル値

対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 1.5, 3.0, 4.0[10^{-6}\text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 60$ [m/h], $v_w = 2000$ [m/h]

図 6-4 期待出火件数密度と最遅避難時刻の関係



(a)25 パーセンタイル値 (b)50 パーセンタイル値 (c)75 パーセンタイル値

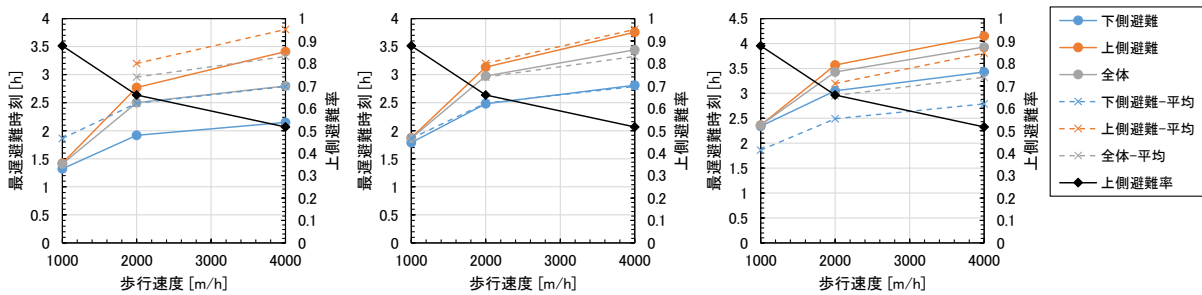
対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 3.0[10^{-6}\text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 30, 60, 100$ [m/h], $v_w = 2000$ [m/h]

図 6-5 延焼速度と最遅避難時刻の関係

b) 避難：歩行速度・避難場所までの距離

図 6-6・図 6-7 に避難基本ケース(Case-7)を基準として、歩行速度及び避難場所までの距離を変化させたときの最遅避難時刻の推移を示す。避難基本ケースは、非常に厳しい火災状況($\rho = 4.0 [10^{-6} \text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 100 [\text{m}/\text{h}]$)を想定しているため、いずれのケースも非常に早くに最遅避難時刻を迎えている。まず、特出する点は、歩行速度が 1000[m/h]の最遅避難時刻分布である。歩行速度 1000 [m/h]の場合、0.001 未満ではあるものの最遅避難時刻が負になる出火パターンが確認された。すなわち、地震と同時に避難を開始しても間に合わないケースが上側避難において存在している。歩行速度が 1000[m/h]は延焼速度の 10 倍の速さであり、競争的な側面では火災からの退避的には十分な速度に思える。しかしながら、上側避難のように避難者の前方で火災が発生し、火災の隙間を横切る避難の場合、不十分な速度であることが示唆される。

歩行速度の増大や避難場所までの距離の増加によって、最遅避難時刻が遅くなることに加え、上側避難率の減少傾向がみられる。火災によるネットワークの途絶が激しい状況下において、これらのパラメータが大きく影響しており、避難者の最寄りに避難場所を設置すること、要支援者の避難支援が非常に重要であることが示唆される。



(a)25 パーセンタイル値

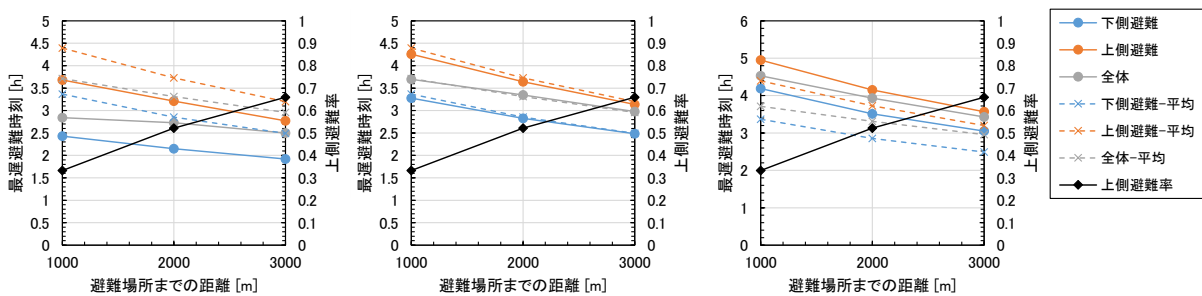
(b)50 パーセンタイル値

(c)75 パーセンタイル値

対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 4.0 [10^{-6} \text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 100 [\text{m}/\text{h}]$, $v_w = 1000, 2000, 3000 [\text{m}/\text{h}]$

※歩行速度 1000 [m/h]のケースの上側避難において、0.001 未満の頻度で最遅避難時刻が負となる出火パターンが発生したため、期待値の評価が不可能となっている。

図 6-6 歩行速度と最遅避難時刻の関係



(a)25 パーセンタイル値

(b)50 パーセンタイル値

(c)75 パーセンタイル値

対象圏域= 格子, $x_s = 1000, 2000, 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 4.0 [10^{-6} \text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 100 [\text{m}/\text{h}]$, $v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}]$

図 6-7 避難場所までの距離と歩行速度と最遅避難時刻の関係

6.6 安全避難比の事前評価

本節では、実験対象のケースについて、安全避難比の事前評価を行った結果を示す。安全避難比は、本来はリアルタイム避難誘導で知りえない最遅避難時刻に対して特定の比率(0.1 から 1.0)で避難開始時刻を設定した上でリアルタイム避難誘導シミュレーションを実施し、避難成功率を集計することで、最遅避難時刻比に対する避難成功率を整理する。安全避難比を分析することで、安全避難時刻を特定する技術的な目的とは別に「最遅避難時刻に対してどの程度早くに避難を開始すべきか」という最遅避難理論の先行研究([金井, 梶 2002]等)からの問題についても、考察することができる。

本研究では、この実験結果をテーブル関数化しておくことで、リアルタイム避難誘導における避難開始時刻決定の時に呼び出して利用する。

6.6.1 基本ケースの分析

図 6-8・図 6-9 に、地震火災基本ケースおよび避難基本ケースにおける、最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移を示す。左から(a) 上側避難, (b)下側避難, (c)全体のサンプルに対して集計した結果である。

a) 最遅避難時刻比に対する避難成功率の特徴

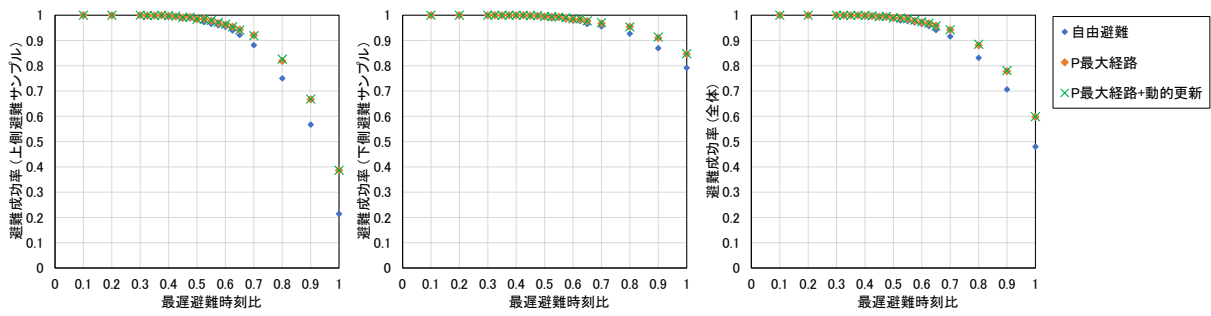
最遅避難時刻比が 1.0 に近づくにつれて、避難成功率の低下傾向がみられる。これは、不完全情報下において、最遅避難時刻付近の避難ほど、経路選択の誤りや経路変更に対する余裕の無さによって、逃げ惑いに陥る可能性を示唆している。

この避難成功率の推移より、以下の 3 つの特徴がみられる。

第一に、最遅避難時刻比が比較的小さいところで、避難成功率が 1.0 から低下しない安全区間がある。これは、いつでも逃げ惑うことなく避難が可能な時期が存在するということを意味している。これは、自由避難でも安全区間は存在しており、早期の避難であれば、避難誘導に頼らずとも自主的な避難によって安全が確保できることを示唆している。一方、こうした安全区間を過ぎた後は、避難成功率は単調に減少していくため、こうした時期のうちに避難準備をしておくことが安全上非常に重要である。

第二に、上側避難と下側避難において、避難成功率が低下し始める最遅避難時刻比が異なる点である。これは、火災に押し出され道路ネットワークが開けた状態で避難する下側避難と避難者の前方の道路ネットワークが途絶された状態で避難する上側避難による、避難の面から見た危険性の違いの表れであると考えられる。地震火災時の不完全情報下において、下側避難か上側避難かを判断することは困難である。どちらを想定するかによって避難成功率が著しく変わるため、上側避難と想定することが安全側の対策となると言える。

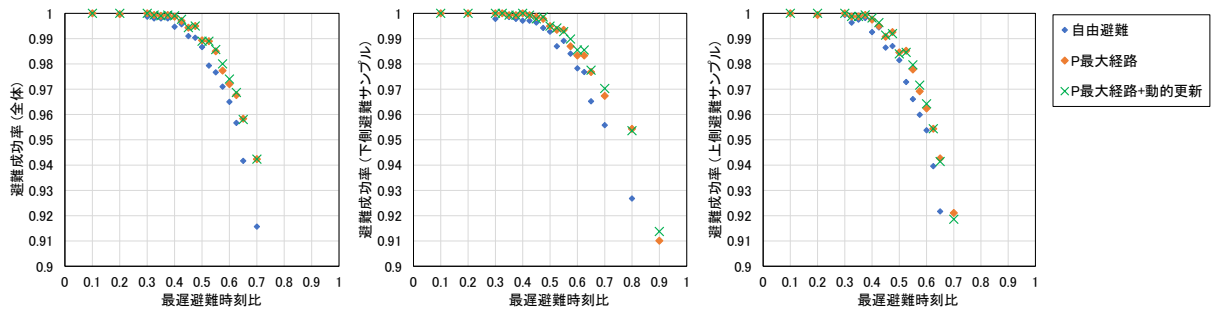
第三に、最遅避難時刻比が 1.0 の場合(最遅避難時刻と同時に避難)でも、避難成功率は 0 ではなく、ある程度避難できる可能性が残されている点である。これは、選択した経路が最遅避難理論を満たす避難経路と一致していることを意味している。そのため、情報を用いる P 最大経路と自由避難の間で大きな差があり、不完全情報下で不確かな情報でありながらも、避難誘導に従うことの重要性を示唆している。



(a)上側避難

(b)下側避難

(c)全体



(a)上側避難

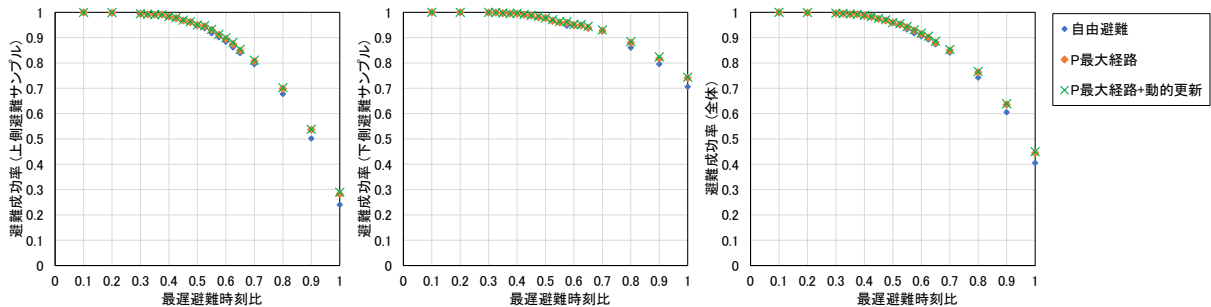
(b)下側避難

(c)全体

対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 3.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 60 [\text{m}/\text{h}]$, $v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}]$, $r = 0.7$

下段: 「避難成功率 ≥ 0.9 」にフォーカス

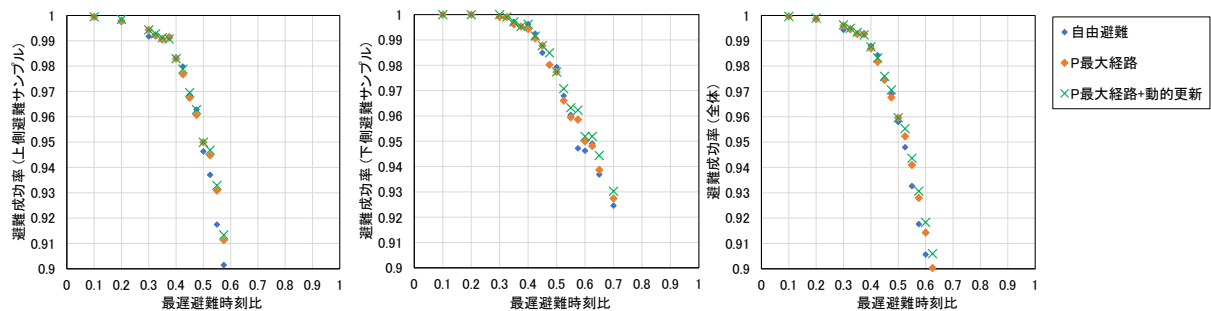
図 6-8 地震火災基本ケースにおける最遅避難時刻比と避難成功率の関係



(a)上側避難

(b)下側避難

(c)全体



(a)上側避難

(b)下側避難

(c)全体

対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 4.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 100 [\text{m}/\text{h}]$, $v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}]$, $r = 0.5$

下段: 「避難成功率 ≥ 0.9 」にフォーカス

図 6-9 避難基本ケースにおける最遅避難時刻比と避難成功率の関係

b) 許容リスクに対する安全避難比

a)の議論より、最遅避難時刻に対して避難すべき時期として、避難成功率が1.0を保つ区間から低下し始めたと判断する閾値を考える必要がある。この時の低下量は、ある避難者にとって逃げ惑う可能性である。この逃げ惑う可能性を許容リスクとして、安全避難比を計算する。本実験では、断続的に最遅避難時刻比を設定してシミュレーションを実施したため、許容リスクと完全一致する最遅避難時刻比は得にくい。そこで、許容リスクを越える最遅避難時刻比の最小値と許容リスクを越えない最遅避難時刻比の最大値を用いて、避難成功率に対する線形補間によって安全避難比を推定した。なお、シミュレーション回数は3000回であり、小さな許容リスクを評価するのに対して限界の試行回数であることから、ある程度の誤差が存在すると許容して議論を進める。

表6-3に、基本ケースにおける許容リスク $p^* = 0.01, 0.05$ に対する安全避難比を示す。許容リスクが $p^* = 0.01$ では0.38から0.57と幅があり、想定する火災情報・避難者情報・覚知確率が広く影響していることがわかる。明確な特徴として、2点確認できる。

第一に、程度は異なるものの、誘導経路(P最大経路, P最大経路+更新)の安全避難比は自由避難と比較して大きいことであり、許容リスク $p^* = 0.05$ において顕著である。これは、リアルタイム避難誘導を実施することで安全避難比を大きく設定することができ、最遅避難時刻に近い時刻でも避難が可能となることが示唆される。第3章・第4章において、避難開始時刻が遅れることで避難成功率の著しい低下が示されたが、避難成功率に避難誘導の頑健性を拡張したことで、避難誘導の効果がより明確に示されている。

第二に、上側避難と下側避難で安全避難比に大きな差があることである。許容リスク $p^* = 0.01$ では0.07程度、 $p^* = 0.05$ では0.1程度と離れている。最遅避難時刻で表すと、4時間後が最遅避難時刻である場合、安全避難比0.1は0.4時間(24分)に相当し、これらの区別を無視することはできない値である。この結果からも、上側避難の危険性が示唆される。また、最遅避難時刻比に対して避難成功率は単調減少するため、上側避難を想定することは、下側避難の安全避難比を保証することにも繋がる。

以上のように、許容リスクに対する安全避難比は誘導経路規範や上下避難、火災状況等、様々なパラメータに影響される。したがって、誘導時の状況や対象となる避難者の属性、誘導経路に合わせた値を取り出せるように、事前に多くのケースについてシミュレーションを実施し整理しておくことが重要である。

表 6-3 基本ケースにおける安全避難比

ケース	誘導経路規範	許容リスク $p^* = 0.01$			許容リスク $p^* = 0.05$		
		上側避難	下側避難	全体	上側避難	下側避難	全体
Case-2 (地震火災 基本ケース)	自由避難	0.44	0.51	0.48	0.61	0.72	0.64
	P最大経路	0.48	0.56	0.50	0.63	0.81	0.68
	P最大経路+更新*	0.48	0.57	0.50	0.63	0.81	0.68
Case-7 (避難 基本ケース)	自由避難	0.38	0.43	0.39	0.49	0.57	0.52
	P最大経路	0.38	0.43	0.39	0.50	0.60	0.53
	P最大経路+更新	0.38	0.44	0.39	0.50	0.63	0.54

※+更新：避難途上の動的更新を実施

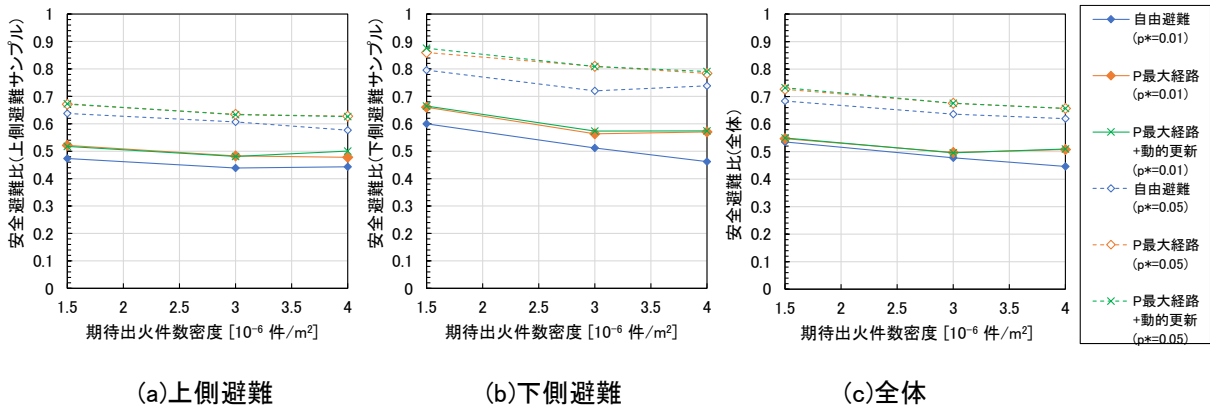
6.6.2 各パラメータと安全避難比の関係

次に、地震火災及び避難のパラメータと安全避難比の関係について観察する。

a) 地震火災：期待出火件数密度・延焼速度

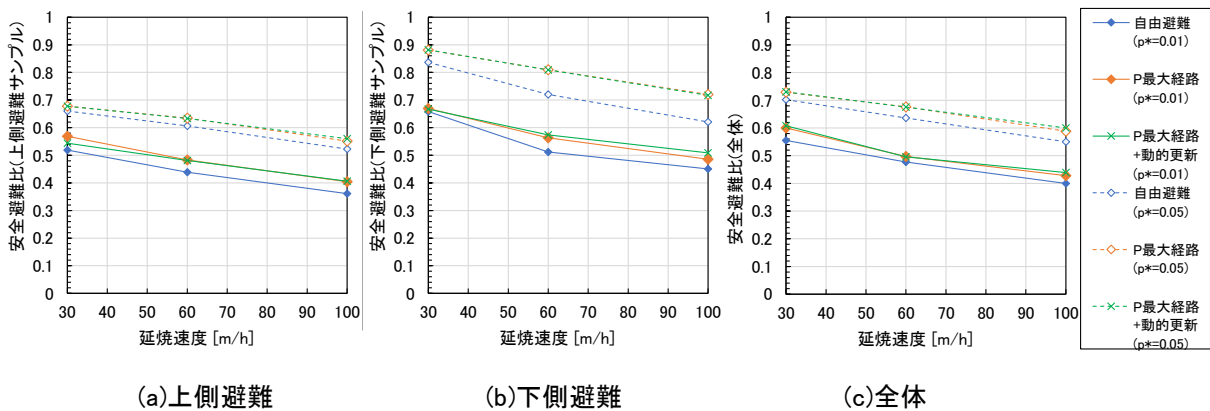
図 6-10・図 6-11 に地震火災基本ケース(Case-2)を基準として、期待出火件数密度及び延焼速度を変化させたときの安全避難比の推移を示す。まず、期待出火件数密度によって、安全避難比は大きく変わらないことがわかる。一方、延焼速度が大きいほど、安全避難比が低下する傾向が確認できる。また、いずれも自由避難と誘導避難(P 最大経路, P 最大家路+動的更新)には差があるものの、動的更新による明確な差は見られない。

出火点の増加は、火災を迂回する機会が増えるものの、基本ケースの延焼速度=60[m/h]では、避難者の歩行速度(2000 [m/h])ならば十分に迂回が可能であることが考えられる。一方、延焼速度の増大は、迂回する場合に大きな迂回が必要となり、基本ケースの期待出火件数密度が $3 [10^{-6} \text{件}/\text{m}^2]$ であり、ある程度高いことから、延焼拡大によって逃げ惑いリスクが増大し、安全避難比が低下したと考えられる。これらについては十分な検証・解析が必要であり、今後の重要課題である。



対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 1.5, 3.0, 4.0 [10^{-6} \text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 60 [m/h]$, $v_w = 2000 [m/h]$, $r = 0.7$

図 6-10 期待出火件数密度と安全避難比の関係



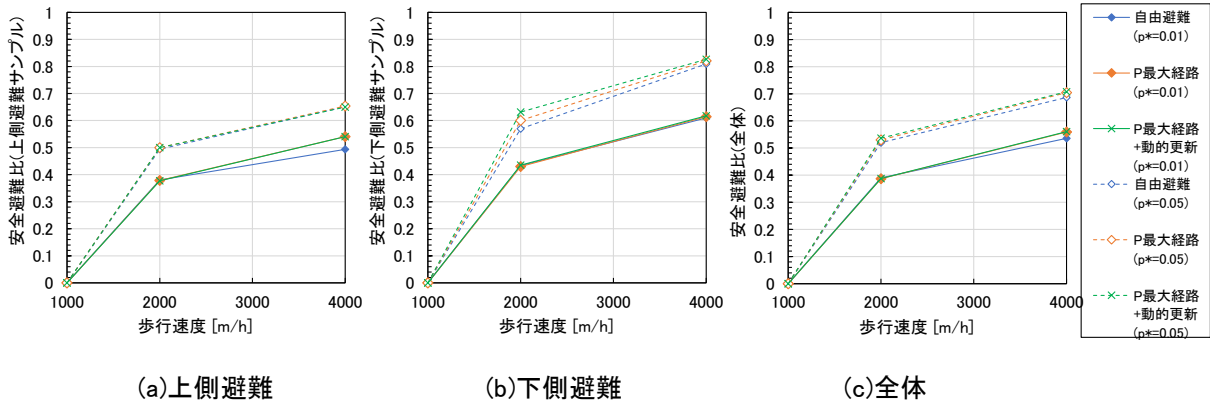
対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 3.0 [10^{-6} \text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 30, 60, 100 [m/h]$, $v_w = 2000 [m/h]$, $r = 0.7$

図 6-11 延焼速度と安全避難比の関係

b) 避難：歩行速度・避難場所からの距離

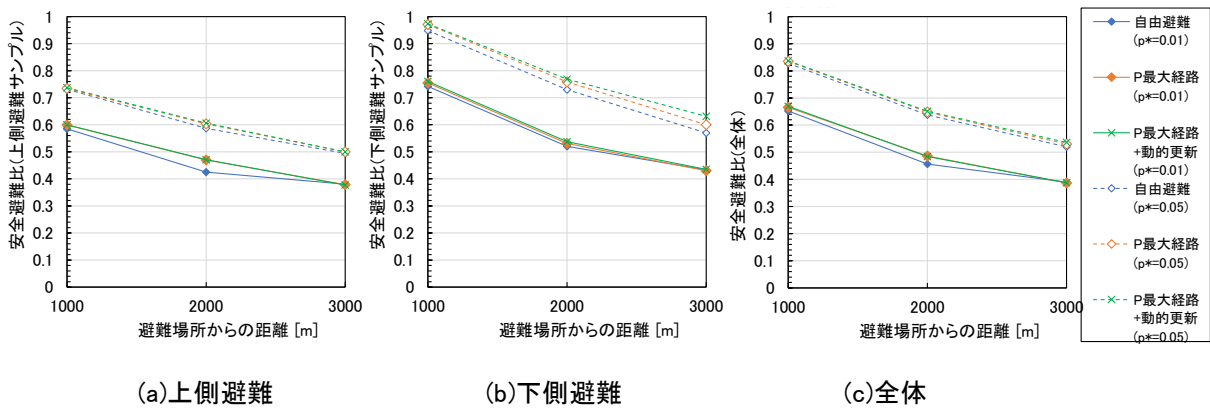
図 6-12・図 6-13 に避難基本ケース(Case-7)を基準として、歩行速度及び避難場所からの距離を変化させたときの安全避難比の推移を示す。歩行速度の増大・避難場所への接近に従い、安全避難比の増大傾向が確認できる。歩行速度の増大若しくは避難場所からの距離の低下は、避難開始後、速やかに避難場所に到達できる可能性を向上させるため、火災への遭遇機会を減らすことが考えられる。加えて、歩行速度の増大によって延焼拡大よりも速く立ち回れ、避難場所からの距離が近ければ少しの迂回で避難場所に到達可能であることから、火災への遭遇後も迂回できる可能性が向上し、逃げ惑いの可能性が低くなる可能性が考えられる。

$v_w = 1000$ [m/h]のケース(Case-6)では、最遅避難時刻比が 0.1 以上の範囲では、許容リスクを満たすことができず、自力で避難ができない障がい者や乳幼児等、避難行動要支援者の搬送には、最遅避難時刻に関わらず地震発生直後に避難するか 2000 [m/h]以上の歩行速度を確保する必要があると言える。



対象圏域= 格子, $x_s = 3000$ m 地点, $\rho = 4.0 \times 10^{-6}$ [件/m²], $v_f = 100$ [m/h], $v_w = 1000, 2000, 4000$ [m/h], $r = 0.5$
 $v_w = 1000$ [m/h]のケース(Case-6)では、最遅避難時刻比=0.1でも許容リスクを満たさなかったため、0としている。

図 6-12 歩行速度と安全避難比の関係



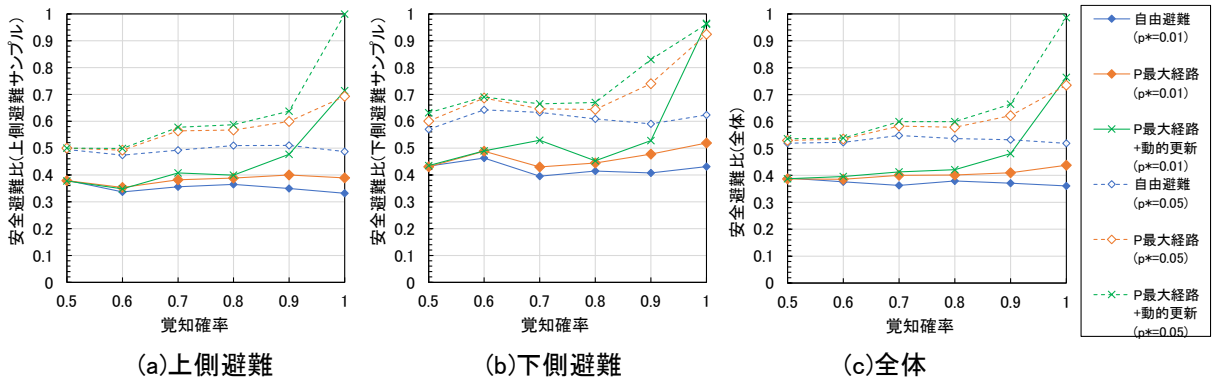
対象圏域= 格子, $x_s = 1000, 2000, 3000$ m 地点, $\rho = 4.0 \times 10^{-6}$ [件/m²], $v_f = 100$ [m/h], $v_w = 2000$ [m/h], $r = 0.5$

図 6-13 避難場所からの距離と安全避難比の関係

c) 避難：覚知確率

図 6-14 に避難基本ケース(Case-7)を基準として、覚知確率を変化させたときの安全避難比の推移を示す。覚知確率の向上による安全避難比の増大は、ある閾値があると考えられる。上側避難に着目すると、動的更新なし(自由避難, P 最大経路)かつ許容リスクが 0.01 の場合、覚知確率の向上による安全避難比の変化は見られない。一方、動的更新あり(P 最大経路+動的更新)かつ許容リスクが 0.05 の場合、覚知確率が 0.8 以上において安全避難比の増大傾向がみられる。

このことから、不完全情報下において、避難誘導情報による安全性の向上効果には、情報の充足(覚知確率の向上)と十分な情報の利用機会(動的更新)が必要であることが示唆される。また、許容リスクを大きくすることで、覚知確率の向上による安全避難比の増大が確認されることから、避難誘導情報によって緩和できる不完全性の限界を示しており、許容リスク=0.01 では、動的更新を行わない限り、情報の充足(覚知確率の向上)による不完全情報下のリスク低減効果に限界が存在していることが示唆される。



対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 4.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 100 [\text{m}/\text{h}]$, $v_w = 2000[\text{m}/\text{h}]$, $r = 0.5 \sim 1.0, 0.1$ 間隔

図 6-14 覚知確率と安全避難比の関係

c) 安全避難比を大きくする要因に関する考察

以上の各パラメータと安全避難比の比較より、安全避難比を規定する大きな要因として、火災遭遇後の迂回しやすさ・速やかに避難場所に到達でき可能性の存在が示唆される。最遅避難時刻は、ある通過時間を考慮した最早閉塞点によって規定されるため、最早閉塞点から避難場所側の経路は比較的自由である。すなわち、最早閉塞点を過ぎた後は、火災遭遇と迂回を繰り返す自由避難によっても避難場所に到達する可能性が残されている。

したがって、安全避難比を向上させるための重要なポイントは、この最早閉塞点よりも避難場所側へ速やかに移動できること・通過後の火災遭遇に対して迅速に迂回することであると考える。この点は、地震火災のパラメータに対して安全避難比の感度が低いことから示唆され、避難者側のリカバリ力が重要であることが考えられる。本研究では、以上の考察のような構造の分析まで踏み込むことはできないが、今後の分析課題として残しておく。

6.7 事前計画避難と勧告避難の最遅避難時刻比

前節までに行った最遅避難時刻の確率分布および安全避難比を事前情報として、任意の最遅避難閾確率を設定することで、事前計画避難・勧告避難による避難開始時刻決定を伴うリアルタイム避難誘導シミュレーションを実施する。最遅避難閾確率とは、事前計画避難・勧告避難それぞれにおいて、ある時刻が安全避難比×最遅避難時刻 [h]を越えていないか判定を行う閾値である。本節では、事前計画避難と勧告避難それぞれによって決定される避難開始時刻が最遅避難閾確率に従った時刻なのか、シミュレーション結果より得られた避難開始時刻の最遅避難時刻比に基づき検証・考察を行う。なお、本結果には、切迫避難による避難開始も含まれていることに留意する。

6.7.1 基本ケースの分析

まず、基本ケースについて、事前計画避難及び勧告避難それぞれについて、得られた避難開始時刻の最遅避難時刻比の度数分布と、安全避難比を超過した割合(安全超過率)と最遅避難閾確率の関係を確認する。ただし、避難開始時刻を決定する際は、6.6節で求めた上側避難の安全避難比に基づき避難開始時刻を決定し、安全避難比の超過は、各シミュレーション試行が上側避難であった場合は上側避難の安全避難比を、下側避難であった場合は下側避難の安全避難比を避難開始時刻の最遅避難時刻比が越えたか否かを判定している。

a) 事前計画避難

図 6-15・図 6-16 に、ある一つの安全避難比の場合の、地震火災基本ケース及び避難基本ケースにおける事前計画避難の最遅避難時刻比の相対度数分布と最遅避難閾確率に対する安全超過率を示す。

まず、最遅避難時刻比の相対度数に着目する((a)最遅避難時刻比の相対度数(全体))。本グラフは、最遅避難閾確率(β)別に、最遅避難時刻比について 0.1 間隔で相対度数を集計し各階級の間値にプロットしたものである。参考として、黒い縦線にて全体サンプルの安全避難比を示している。最遅避難閾確率が大きくなるほど、安全避難比に対して左(0.0)寄りから右(1.0)寄りに分布が推移し、広く分布していることが確認できる。事前計画避難は、固定的な避難開始時刻を最遅避難閾確率に基づき設定される。したがって、切迫避難を除いて得られる最遅避難時刻比の分子は定数となり、分母の最遅避難時刻が 6.4.2 節の確率分布に従い与えられる。最遅避難閾確率が低ければ早期に、最遅避難閾確率が高ければ遅くに避難開始時刻が設定されることから、最遅避難閾確率に応じて左右に分布が推移する。

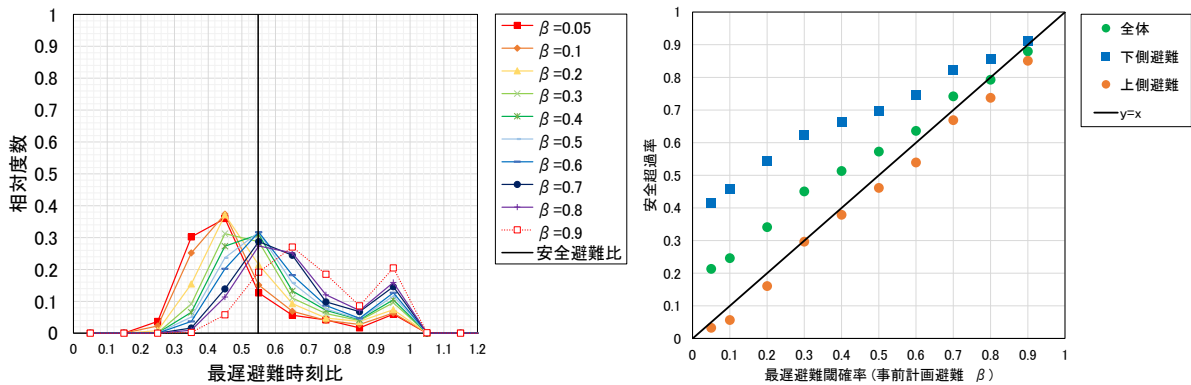
また、分布のピークは 2 つ存在し、安全避難比周辺と 0.9~1.0 の階級である。最遅避難閾確率を大きくすることで、全体の分布が 0.9~1.0 の階級へ集中していく様子が確認できる。また、この傾向は地震火災基本ケースよりも避難基本ケースの方が強い。これは、安全避難比の設定値が影響していると考えられる。安全避難比が大きいほど、固定的な避難開始時刻が遅くに設定される。加えて、本研究では火災の接近によって避難開始する切迫避難が存在する。そのため、安全避難比が 1.0 よりも十分に低い場合には、概ね最遅避難時刻よりも手前に避難開始時刻が決定されると考えられる。以上をまとめると、最遅避難閾確率が大きい程、安全避難比を超過するように分布が推移するものの、安全避難比が 1.0 より

6.7 事前計画避難と勧告避難の最遅避難時刻比

も十分に低い場合には切迫避難によって最遅避難時刻には避難開始が実行されることが、事前計画避難における最遅避難時刻比の分布の特徴である。

次に、最遅避難閾確率に対する安全超過率(b)安全超過率)に着目する。本研究では、安全避難比の設定および使用する最遅避難時刻分布は上側避難の値を採用しているため、上側避難において最遅避難閾確率と安全超過率はおおむね一致している。避難開始時刻は判断間隔(0.1 [h])で行われ、少数部分は切り捨てられるため、幾分か安全寄りに分布している。一方、上側避難の場合、下側避難の安全避難比よりも設定された安全避難比は低いものの、上側避難の最遅避難時刻分布は下側避難よりも遅い時刻に分布するため、安全超過率は最遅避難閾確率よりも高くなる。

以上のように、事前計画避難は固定的な避難開始時刻という特性上、最遅避難時刻の確率分布に依存して、避難開始時刻の最遅避難時刻比の分布が決定される。事前に評価した同一の分布で設定するため、対象の出火パターン(上側避難)に対しては遅避難閾確率が正確に機能する一方、対象外の出火パターン(下側避難)の構造は安全側又は危険側に振れてしまう欠点が存在する。

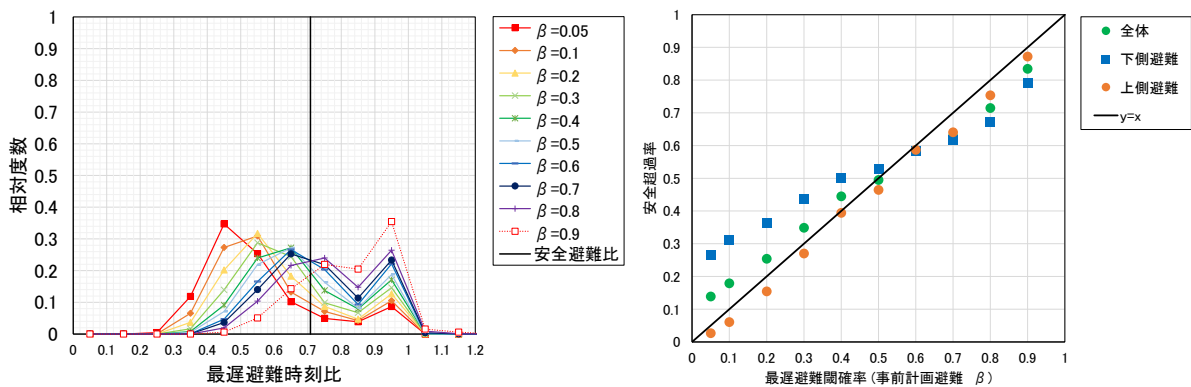


(a) 最遅避難時刻比の相対度数(全体)

(b) 安全超過率

$$x_s = 3000\text{m 地点}, \rho = 3.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2], v_f = 60 [\text{m}/\text{h}], v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}], r = 0.7$$

図 6-15 地震火災基本ケースにおける事前計画避難の最遅避難時刻比



$$x_s = 3000\text{m 地点}, \rho = 4.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2], v_f = 100 [\text{m}/\text{h}], v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}], r = 0.5$$

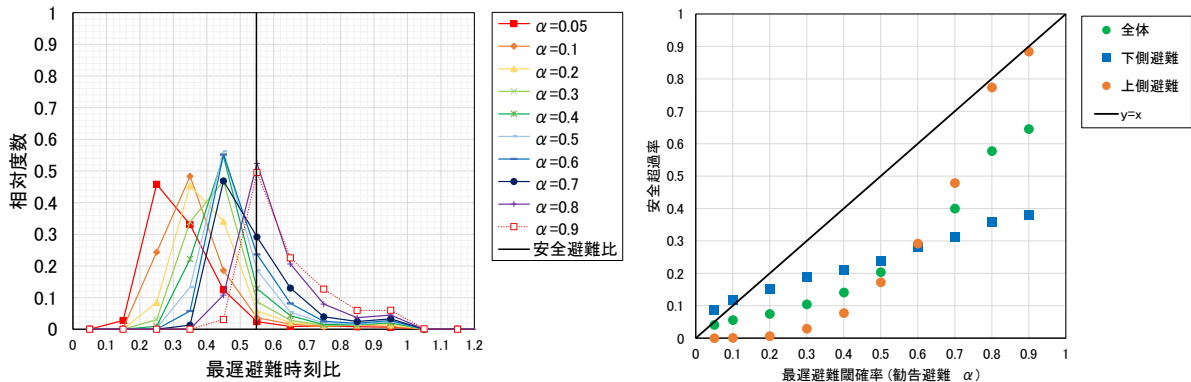
図 6-16 避難基本ケースにおける事前計画避難の最遅避難時刻比

b) 勧告避難

図 6-17・図 6-18 に、ある一つの安全避難比の場合の、地震火災基本ケース及び避難基本ケースにおける勧告避難の最遅避難時刻比の相対度数と最遅避難閾確率に対する安全超過率を示す。グラフの詳細は事前計画避難と同様であるため、前述を参照されたい。

勧告避難の最遅避難時刻比の特徴は、事前計画避難のそれとは明確に異なる。

まず、最遅避難時刻比の相対度数に着目する。勧告避難の最遅避難時刻比の分布の特徴は、大きなピークが 1 つ存在しその周辺に比較的狭く分布を形成している。最遅避難閾確率が大きくなるほど右(1.0)寄りに推移するが、最遅避難閾確率が 0.5 前後において安全避難比の周辺にピークが集中している。勧告避難は、覚知火災情報に応じた確率評価によって避難開始時刻が決定されるため、避難開始時刻は出火・覚知パターンに応じて異なる。そのため、正確に最遅避難確率の評価をすることができれば、最遅避難時刻に追従して避難開始時刻が決定される。最遅避難時刻比のばらつきは、未覚知火災の不確実性によるものに限定されるため、分布形状はピークを中心に狭く分布するわけである。

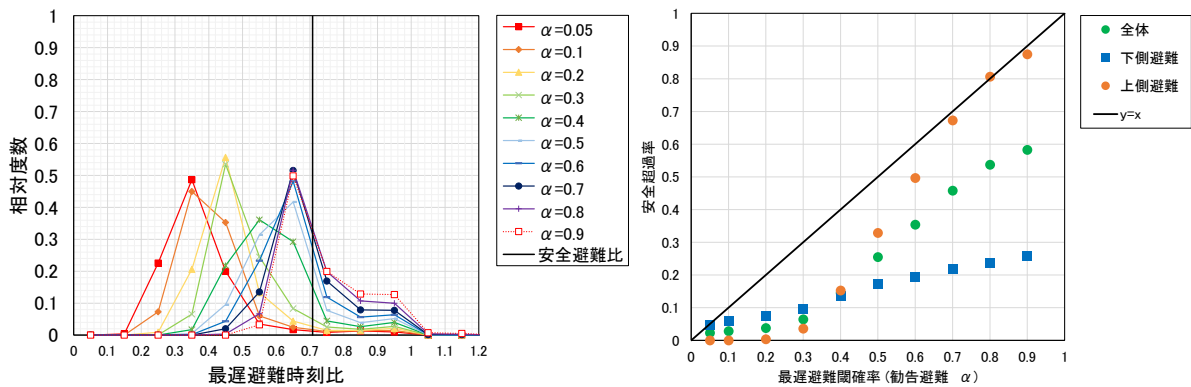


(a) 最遅避難時刻比の相対度数(全体)

(b) 安全超過率

$$x_s = 3000\text{m 地点}, \rho = 3.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2], v_f = 60 [\text{m}/\text{h}], v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}], r = 0.7$$

図 6-17 地震火災基本ケースにおける勧告避難の最遅避難時刻比



(a) 最遅避難時刻比の相対度数(全体)

(b) 安全超過率

$$x_s = 3000\text{m 地点}, \rho = 4.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2], v_f = 100 [\text{m}/\text{h}], v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}], r = 0.5$$

図 6-18 避難基本ケースにおける勧告避難の最遅避難時刻比

6.7 事前計画避難と勧告避難の最遅避難時刻比

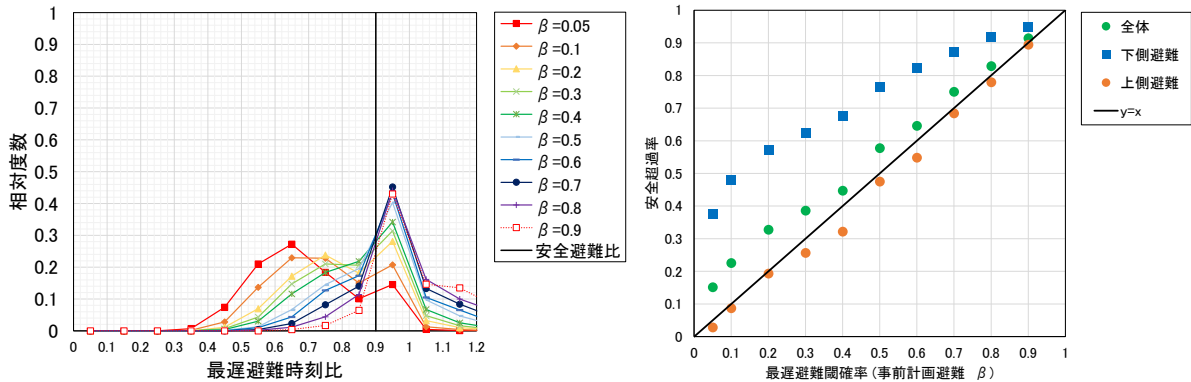
以上の考察では、事前計画避難よりも勧告避難の方が優れているように思われるが、勧告避難においても問題は存在する。最遅避難閾確率に対する安全超過率(各図の(b)安全超過率)に着目する。事前計画避難と比較して、対角線上から外れて分布していることがわかる。勧告避難の問題点は、最遅避難確率を評価する際の連結信頼性の確率評価における技術的な精度に影響することである。本研究の手法では、2つの誤差要因が考えられる。1つ目は、ミニマルパスの探索精度である。本研究では、多様かつ十分な本数のミニマルパスの選択が保証されていなく、不足している場合、連結信頼性は過少評価される。2つ目は、信頼性に用いている避難可能確率は覚知火災による道路閉塞時間の影響やリンク間の接続部分の影響が考慮されていないことである。これにより、信頼性と実際の閉塞確率に誤差が存在する可能性は否定できない。なお、下側避難において安全側に寄っている原因は、上側避難の安全避難比に合わせているため、最遅避難確率の評価手法の技術的問題とは直接関係しないと思われる。

以上のように、解決すべき技術的な課題は大きいものの、勧告避難によって覚知火災情報に合わせたばらつきの少ない避難開始時刻の設定が可能となると示唆される。また、最遅避難確率の評価手法の特性について十分に分析・理解した上で使用することで、上記の問題が緩和されると思われる。

6.7.2 避難開始時刻決定の適用範囲の問題 -安全避難比が 1.0 に近い場合の影響-

ここで、本手法による避難開始時刻の決定手法の問題点を 1 つ説明する。安全避難比は、最遅避難時刻に対して余裕を持たせて避難開始するための一指標に過ぎないため、避難開始時刻比が安全避難比を越えた避難であっても、出火パターンによっては安全に避難可能である。しかし、避難開始時刻比が 1.0 を超えた場合は例外である。避難開始時刻比が 1.0 を超えることは最遅避難時刻を見逃して直ちに避難不能になることである。安全避難比を 1.0 に設定した場合、最遅避難閾確率が被災確率に相当してしまい、本研究の避難開始時刻決定は適用できない。一部にて、こうしたケースが見られたため、本項にて紹介する。

図 6-19・図 6-20 事前計画避難・勧告避難それぞれについて、安全避難比が 1.0 に近いケースの最遅避難時刻比の相対度数分布と安全超過率を示す。それぞれ安全避難比が 0.9 であり、1.0 に近い安全避難比である。事前計画避難では、前項で紹介したケースと同様、最遅避難閾確率に応じて左右にシフトしている。大きく異なる点は、最遅避難閾確率が大きいほど、1.05 の相対度数高くなっていることである(実際にはこれ以降にも分布している)。

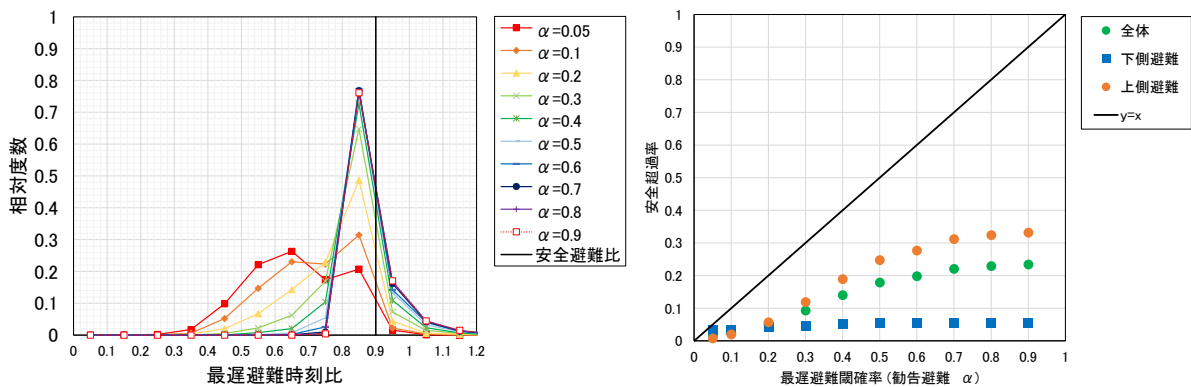


(a) 最遅避難時刻比の相対度数(全体)

(b) 安全超過率

$$x_s = 3000\text{m 地点}, \rho = 4.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2], v_f = 100 [\text{m}/\text{h}], v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}], r = 1.0$$

図 6-19 「安全避難比=0.9」における事前計画避難の最遅避難時刻比



(a) 最遅避難時刻比の相対度数(全体)

(b) 安全超過率

$$x_s = 3000\text{m 地点}, \rho = 4.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2], v_f = 100 [\text{m}/\text{h}], v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}], r = 1.0$$

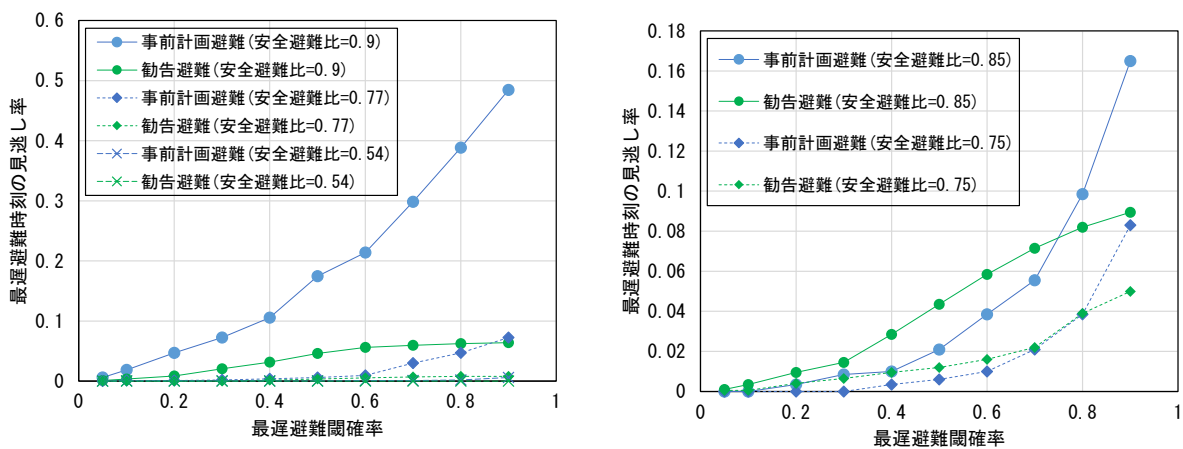
図 6-20 「安全避難比=0.9」における勧告避難の最遅避難時刻比

6.7 事前計画避難と勧告避難の最遅避難時刻比

同ケースにおける勧告避難については、超過している分布は少ない。(b)安全超過率に着目すると、最遅避難閾確率と安全超過率の対角線を大きく下回っており、最遅避難確率の評価があまり機能していないと思われる。しかしながら、それでもわずかに避難開始時刻比が1.0を超えている。

図 6-21 は、最遅避難閾確率に対する最遅避難時刻の見逃し率(最遅避難時刻比が 1 を超えたサンプル数の比率)の推移を示す。左図のケースは、覚知確率が 1.0 のケースである。安全避難比が 1.0 に近いほど、最遅避難閾確率の上昇に対して、最遅避難時刻の見逃し率が増大していることが確認できる。この傾向は、事前計画避難において顕著であるが、勧告避難でもややみられる。覚知確率が 1.0 の場合、多くの火災を覚知しているため、ミニマルパスの探索が困難であり十分なミニマルパスが得られていない可能性がある。一方、安全避難比が 1.0 に近い場合、近い未来の最遅避難確率を評価するため、勧告判断を見送る可能性が高く、見送り続けた結果、最遅避難時刻を迎えたというサンプルも存在したのではないかと考えられる。右図は、1000m 地点から避難開始するケースである。本来、避難リスクは比較的 low、前節までの分析においても、上側避難率が低く安全避難比を大きく取れるケースである。また、覚知確率も 0.5 であるため、ミニマルパスは十分に探索でき最遅避難確率もある程度良く評価ができていたケースである。しかし、最遅避難閾確率の上昇と共に、事前計画避難・勧告避難共に最遅避難時刻の見逃し率が上昇している。

以上、本モデルの適用範囲に関する問題として、安全避難比が 1.0 に近いケースの最遅避難時刻の見逃し可能性について指摘した。この問題は、不完全情報下である特定の時刻における避難開始を目標とするのに付随する不確実性とも考えられる。こうしたケースにおいては、本研究手法による避難開始時刻決定を行う場合、最遅避難閾確率を十分に低い値を設定するか、安全避難比の設定に上限を設ける必要がある。もともと安全性が高いケースが多く、安全避難比を実際よりも低く設定したとしてもある程度避難開始までの猶予時間を確保されやすいことが予想される。この問題については、不完全情報下の避難誘導の限界であることを示すとともに、今後の研究課題として残すとする。



左図のケース : $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 4.0 \times 10^{-6}$ [件/m²], $v_f = 100$ [m/h], $v_w = 2000$ [m/h], $r = 1.0$

右図のケース : $x_s = 1000\text{m}$ 地点, $\rho = 4.0 \times 10^{-6}$ [件/m²], $v_f = 100$ [m/h], $v_w = 2000$ [m/h], $r = 0.5$

図 6-21 最遅避難閾確率に対する最遅避難時刻の見逃し率の推移

6.8 許容リスクに基づく避難開始時刻の遅延化評価

本節では、許容リスクを満たす避難開始時刻の遅延化について効果検証を行う。まず、基本ケースを対象として、遅延化された避難開始時刻の推定過程を示し、その後、各パラメータと遅延化された避難開始時刻の関係について検証・考察する。

6.8.1 マップによる許容リスクを満たす避難開始時刻の特定

図 6-22 に事前計画避難・勧告避難の最遅避難閾確率の組み合わせに対する避難開始時刻一避難成功率マップを示す。まず、許容リスクを満たす事前計画避難・勧告避難の最遅避難閾確率の組み合わせ $\{\alpha, \beta\}$ についてリアルタイム避難誘導シミュレーションを実施し、モンテカルロ法によって各組合せに対する避難開始時刻の中央値及び避難成功率を算出した。本マップでは、各ブロックがある $\{\alpha, \beta\}$ に対する避難開始時刻・避難成功率を表している。ただし、 $\alpha = 1, \beta < 1$ のブロック(青色枠内)は切迫避難+事前計画避難を、 $\alpha < 1, \beta = 1$ のブロック(緑色枠内)は切迫避難+勧告避難を、 $\alpha = 1, \beta = 1$ のブロック(黒太枠内)は避難誘導による避難開始時刻決定は行わない切迫避難のみの避難を表している。図のように、避難成功率をカラースケールによって表すことで許容リスクが満たされる $\{\alpha^*, \beta^*\}$ について一目で確認できる。

許容リスクが満たされる $\{\alpha^*, \beta^*\}$ についてはブロックの縁を黒枠で表している。最遅避難閾確率が高いほど避難開始時刻は遅くなるため、黒枠ブロックとそれ以外のブロックの境界に避難開始時刻を遅延化する $\{\alpha^*, \beta^*\}$ の組み合わせが配置されている。図 6-22 の例では、 $\{\alpha^*, \beta^*\} = \{1.0, 0.5\}, \{0.9, 0.5\}, \{0.6, 0.7\}, \{0.7, 0.8\}, \{0.6, 0.9\}, \{0.6, 1.0\}$ が遅延化した組み合わせである。この組み合わせより、事前計画避難のみに従う場合、 $\{\alpha^*, \beta^*\} = \{1.0, 0.5\}$ 、避難開始時刻=3.5 [h]となり、勧告避難のみに従う場合 $\{\alpha^*, \beta^*\} = \{0.6, 1.0\}$ 、避難開始時刻=3.5[h]、事前計画避難・勧告避難を組み合わせる場合(以下「リアルタイム避難」)、 $\{\alpha^*, \beta^*\} = \{0.7, 0.7\}$ 、避難開始時刻=3.8[h]となる。図中のケースの場合、両者を組み合わせたリアルタイム避難が最も遅延化させることがわかる。

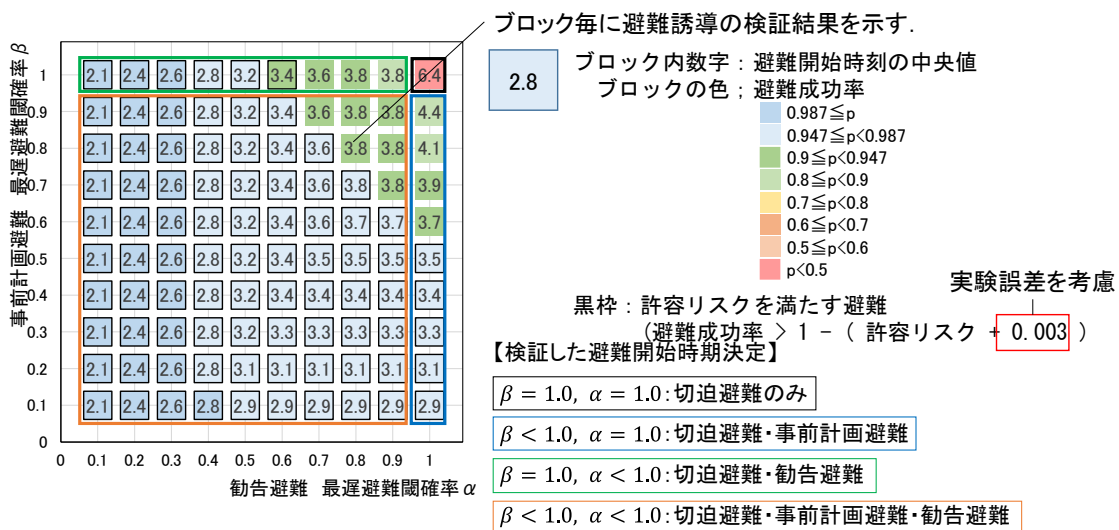


図 6-22 避難開始時刻一避難成功率マップ

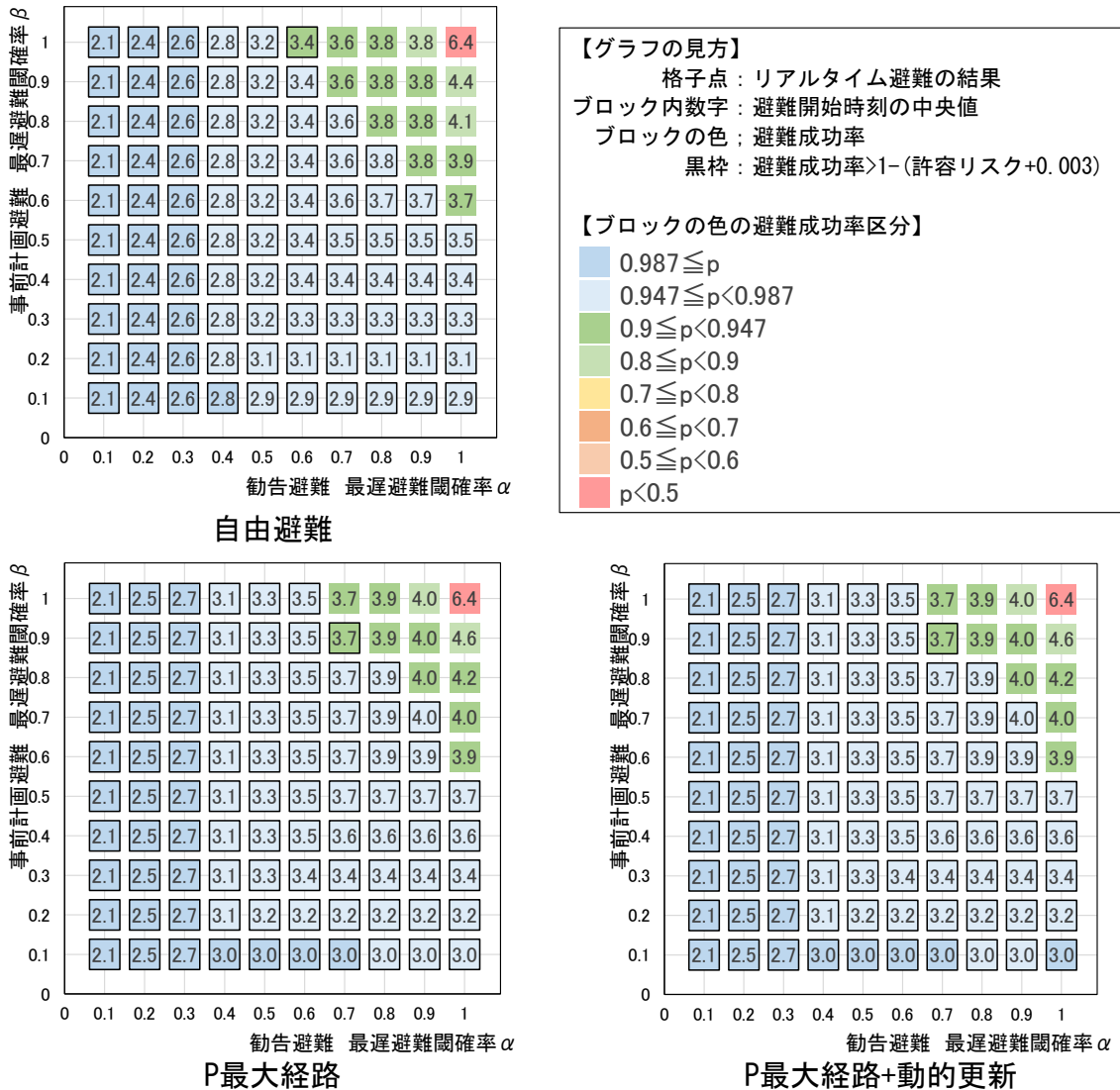
6.8.2 基本ケースの分析

まず、基本ケースについて、避難開始時刻・避難成功率マップについて確認する。

a) 地震火災基本ケース

図 6-23 に地震火災基本ケースの許容リスク=0.05 における避難開始時刻・避難成功率マップを示す。まず、切迫避難のみ($\alpha = 1.0, \beta = 1.0$)では、避難成功率は 0.5 以下である。切迫避難は火災が接近するまで避難開始しないため、事前計画避難もしくは勧告避難によって避難開始させることが必要であり、地震火災の延焼拡大に対して見切りを考慮しながら避難体制の重要性が示唆される。許容リスクを満たす $\{\alpha^*, \beta^*\}$ の組み合わせは、事前計画避難と勧告避難の間に対称性が確認できる。

許容リスクを満たす $\{\alpha^*, \beta^*\}$ の組み合わせは、 $\alpha + \beta \cong$ 定数の上に存在している。これは、事前計画避難と勧告避難それぞれが見逃してしまう出火パターンを互いに補うことで、



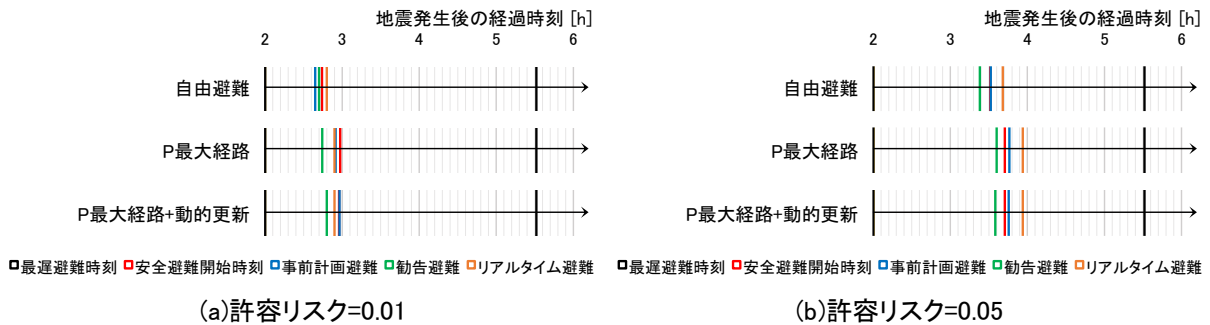
$x_s = 3000$ m地点, $\rho = 3.0 \times 10^{-6}$ [件/m²], $v_f = 60$ [m/h], $v_w = 2000$ [m/h], $r = 0.7$, 許容リスク=0.05

図 6-23 地震火災基本ケースにおける避難開始時刻-避難成功率マップ

6.8 許容リスクに基づく避難開始時刻の遅延化評価

高い最遅避難閾確率で避難成功率を満たされることを意味している。一方、 $\{\alpha^*, \beta^*\}$ を満たす組み合わせにおいて、避難開始時刻が遅くなる組み合わせは事前計画避難に寄っている(勧告避難の最遅避難閾確率が高い)。すなわち、事前計画避難における最遅避難閾確率を低く設定し、事前計画による自主的な避難をより安全側に設定し、補助として高い最遅避難閾確率で勧告避難を設定する状態が、避難開始時刻を遅延化することに寄与していると言える。すなわち、本ケースでは、より確実に安全避難開始時刻を迎えていることが確認できる(最遅避難確率が高い)状態で、避難勧告による避難開始の決定を下すことが重要であることが示唆される。

図 6-24 に避難開始時刻・避難成功率マップより求めた許容リスクに対する避難開始時刻を示す。左図に「許容リスク=0.01」、右図には「許容リスク=0.05」のケースについて、誘導経路規範別に最遅避難時刻(黒線)、安全避難開始時刻(赤線)、事前計画避難(青線)、勧告避難(緑線)、事前計画避難と勧告避難を組み合わせた避難(リアルタイム避難、橙線)について、避難開始時刻の中央値をプロットしている。ただし、勧告避難・事前計画避難・リアルタイム避難は、許容リスクを越える組み合わせのうち中央値が最小な避難開始時刻と許容リスクを越えない組み合わせのうち中央値が最大な避難開始時刻より、線形補間によって求めている。勧告避難・事前計画避難・リアルタイム避難のいずれかにおいて、安全避難開始時刻と殆ど同時刻がそれ以降に避難誘導による避難開始時刻がプロットされており、許容リスクを満たすように安全避難開始時刻が実現化されている。勧告避難に着目すると、安全避難時刻に対して、0.1~0.3 [h]ほど早く避難開始時刻が設定されている。前述の通り、本ケースでは、避難開始時刻の遅延化への寄与は事前計画避難が大きく、勧告避難は補助的な効果であるため、勧告避難のみでは遅延化が上手く実施されなかったと推察できる。

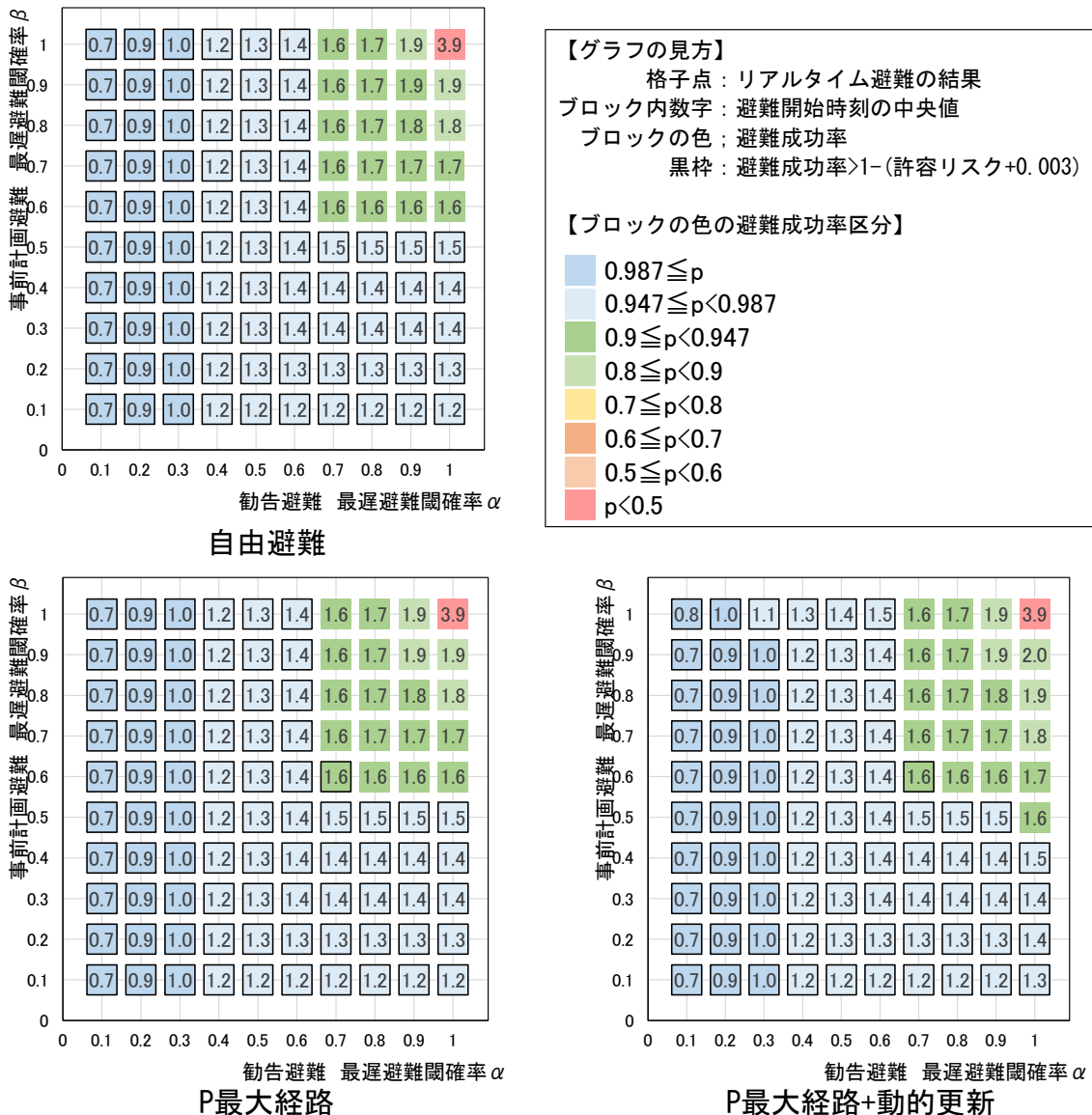


$$x_s = 3000\text{m地点}, \rho = 3.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2], v_f = 60 [\text{m}/\text{h}], v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}], r = 0.7$$

図 6-24 地震火災基本ケースにおける許容リスクを満たす避難開始時刻

b) 避難基本ケース

図 6-25 避難基本ケースの許容リスク=0.05 における避難開始時刻・避難成功率マップを示す。本ケースは、地震火災基本ケースとは異なり、許容リスクを満たす $\{\alpha^*, \beta^*\}$ は、「 $\alpha = 0.6$ 」または「 $\beta = 0.5$ 」となるプロット上に存在する。これは、事前計画避難・勧告避難が互いを補う関係にないことを意味している。避難基本ケースは、覚知確率が 0.5 と比較的に低く覚知火災情報による影響が小さいため、最遅避難確率の計算に用いられるミニマルパスセットが毎回同様である可能性が高く、情報が無い状態での避難開始時刻の決定とあまり変わらないと推察される。すなわち、リアルタイムのタイミングで事前避難計画と同様な特性の避難開始時刻を算出していることが示唆される。



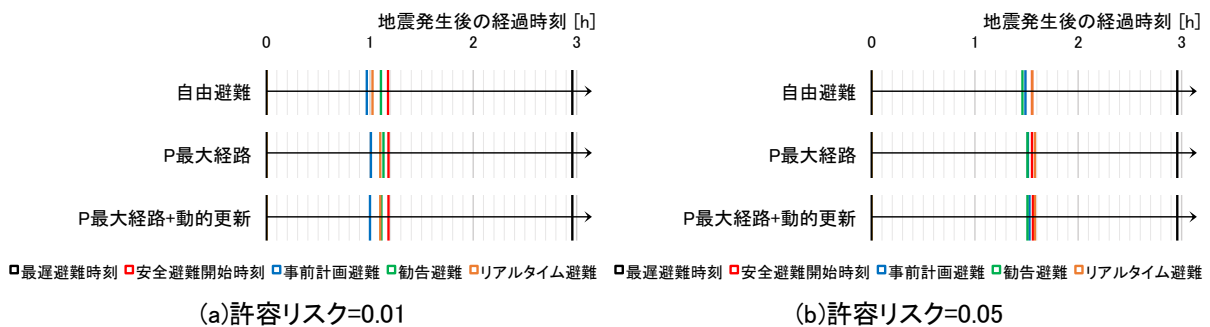
$x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 4.0 \times 10^{-6}$ [件/m²], $v_f = 100$ [m/h], $v_w = 2000$ [m/h], $r = 0.5$, 許容リスク=0.05

図 6-25 避難基本ケースにおける避難開始時刻—避難成功率マップ

6.8 許容リスクに基づく避難開始時刻の遅延化評価

図 6-26 に避難基本ケースにおける許容リスクを満たす避難開始時刻をプロットした図を示す。いずれの許容リスクにおいても、安全避難開始時刻よりも早期のタイミングで事前計画避難・勧告避難・リアルタイム避難の避難開始時刻がプロットされている。許容リスクが 0.05 ではその程度が低くなっており、安全避難開始時刻と同時刻に避難開始時刻が設定されている。

以上のように、事前計画避難・勧告避難・これらを組み合わせたリアルタイム避難によって、避難開始時刻の遅延化が図られる。ただし、その上限には安全避難開始時刻があり、いかに安全避難開始時刻に近づけるように最遅避難閾確率を設定するかが鍵である。最遅避難閾確率の組み合わせは、固定的な事前計画避難に対して、その時の覚知火災情報を考慮した勧告避難によって補助的に避難開始時刻が逐次変更されることが重要である。避難基本ケースのように覚知確率が低いケースでは、最遅避難確率の計算時に覚知火災情報の影響がほとんど反映されないため、事前計画避難のように殆ど固定的な避難開始時刻になってしまっている(すなわち、毎回同様なミニマルパスセットに基づき最遅避難確率を計算)可能性が高く、事前計画避難を補助する関係となっていないことが示唆される。地震火災状況・覚知状況に応じて避難開始時刻の特性は異なるため、避難開始時刻・避難成功率マップで確認することが大切である。



対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 4.0 \times 10^{-6}[\text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 100 [\text{m}/\text{h}]$, $v_w = 2000 [\text{m}/\text{h}]$, $r = 0.5$

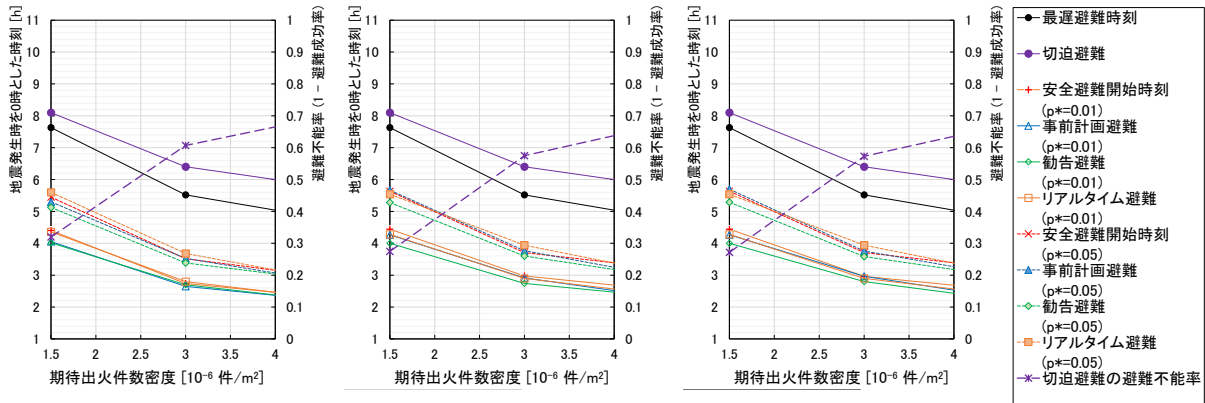
図 6-26 避難基本ケースにおける許容リスクを満たす避難開始時刻

6.8.3 各パラメータと避難開始時刻の関係

次に、地震火災及び避難のパラメータと許容リスクを満たす避難開始時刻の関係について観察する。

a) 地震火災：期待出火件数密度・延焼速度

図 6-27・図 6-28 に、期待出火件数密度及び延焼速度と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係を示す。期待出火件数密度及び延焼速度が大きくなるほど、最遅避難時刻及び安全避難開始時刻の低下に従い、各避難方針による避難開始時刻も低下している。一方、各避難方針において安全避難開始時刻付近での避難開始が実現している。ただし、勧告避難はやや早期に避難開始時刻が設定されている。事前計画避難を軸として避難開始時刻の決定体制を整える必要がある。この傾向は地震火災のパラメータによる変動はあまり見られなかった。ただし、地震火災リスクの増大に対して切迫避難における避難不能率の増大は顕著であり、事前計画避難・勧告避難による避難開始時刻の決定体制の重要性も増大すると示唆される。



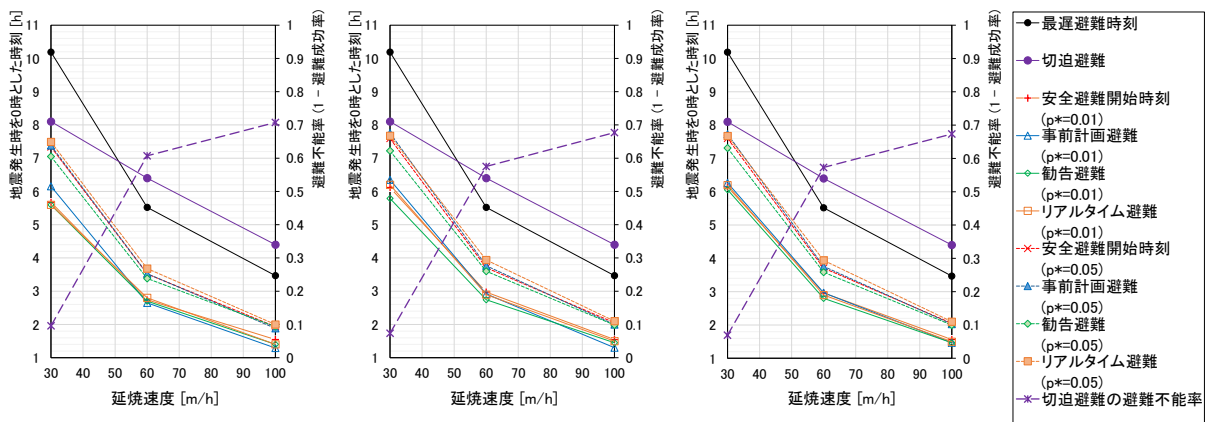
(a)自由避難

(b)P 最大経路

(c)P 最大経路+動的更新

対象圏域 = 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 1.5, 3.0, 4.0 [10^{-6}\text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 60 [m/h]$, $v_w = 2000 [m/h]$, $r = 0.7$

図 6-27 期待出火件数密度と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係



(a)自由避難

(b)P 最大経路

(c)P 最大経路+動的更新

対象圏域 = 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 3.0 [10^{-6}\text{件}/\text{m}^2]$, $v_f = 30, 60, 100 [m/h]$, $v_w = 2000 [m/h]$, $r = 0.7$

図 6-28 延焼速度と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係

b) 避難：歩行速度・避難場所までの距離

図 6-29・図 6-30 に、歩行速度及び避難場所までの距離と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係を示す。歩行速度の低下・避難場所までの距離の減少に対して、最遅避難時刻及び安全避難開始時刻の低下に従い、各避難方針による避難開始時刻も低下している。許容リスクを満たす避難開始時刻は、避難場所までの距離が 1000[m]のケースを除いて安全避難開始時刻付近に常に存在している。避難場所までの距離が 1000[m]のケースは、安全避難比が非常に大きなケースであり(6.6.2), 6.7.2 で指摘した最遅避難時刻の見逃し可能性が高いケースである。したがって、許容リスクの制約下では、安全避難開始時刻付近での避難開始を事前計画避難・勧告避難で設定することが難しいと考えられる。加えて、上側避難率が低いケース(6.5.2)であり、すべての出火ケースを上側避難と想定して避難開始時刻を決定する本モデルでは、より早い時刻が避難開始時刻として設定されてしまう推察される。

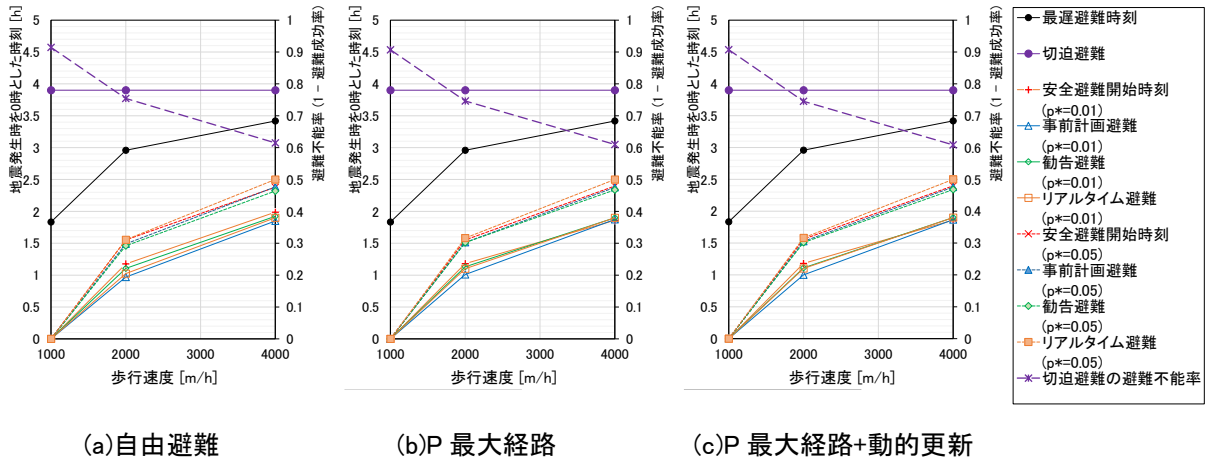


図 6-29 歩行速度と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係

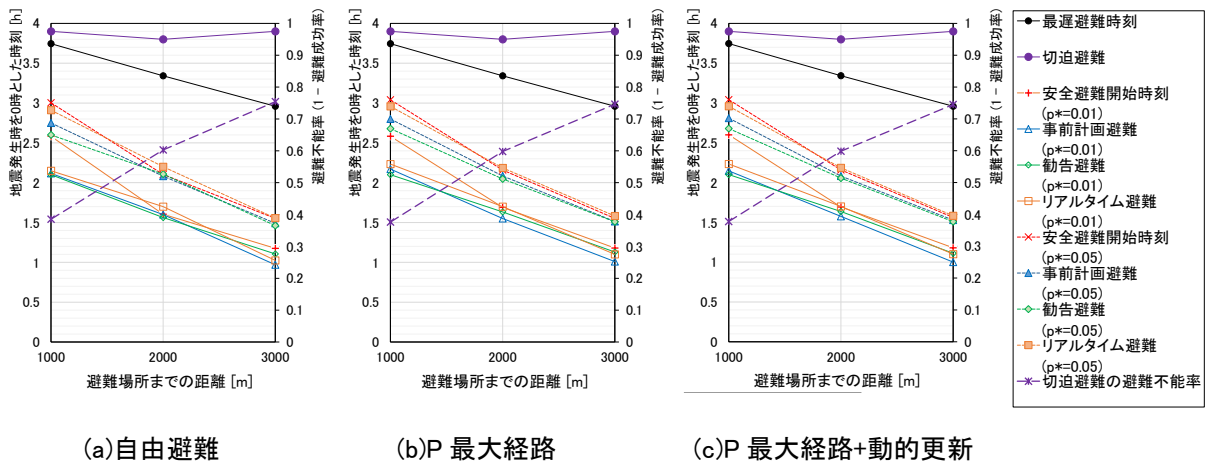


図 6-30 避難場所までの距離と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係

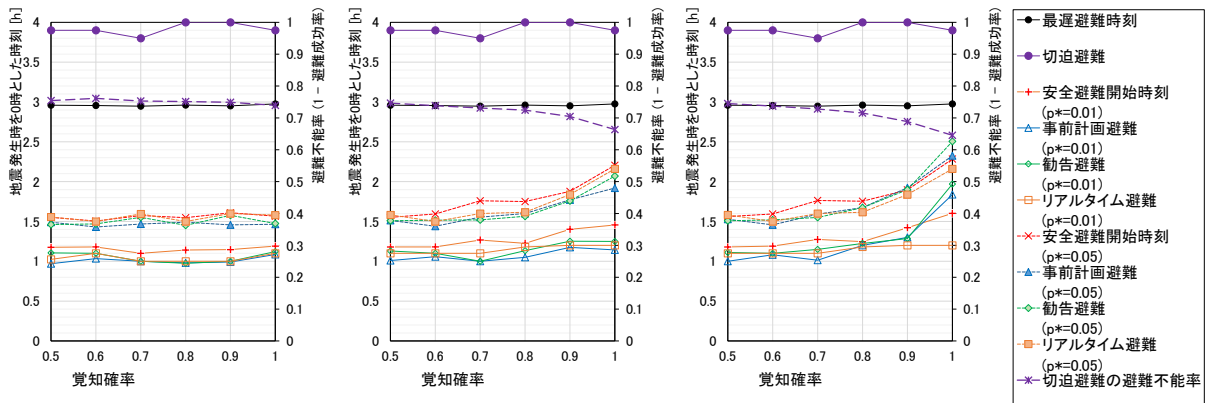
c) 避難：覚知確率

図 6-31 に、覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係を示す。覚知確率の向上に対する避難開始時刻の挙動は、避難誘導規範によって異なる。

自由避難は覚知火災情報に従って経路選択が行われないため、覚知確率の向上に対して安全避難開始時刻の増大は見られず、安全避難開始時刻を上限として事前計画避難・勧告避難の避難開始時刻がプロットされている。「許容リスク=0.01」の場合には事前計画避難と勧告避難の差が小さい。安全避難比が低いため、地震発生後の早期の勧告判断が必要となり、十分な覚知情報を考慮した最遅避難確率の計算ができないことが原因と考えられる。一方、「許容リスク=0.05」の場合には安全避難比が高くなるため、ある程度時間が経過した時点で勧告判断がなされる。したがって、勧告避難やリアルタイム避難が事前計画避難と比較して避難開始時刻の遅延化が実現できている。

P 最大経路及び P 最大経路+動的更新に着目すると、覚知確率の向上に対して安全避難開始時刻の増大に伴い、事前計画避難・勧告避難・リアルタイム避難の「許容リスク=0.05」における避難開始時刻の増大が確認できる。リアルタイム避難・勧告避難がより遅い時刻にプロットされており、覚知火災情報を考慮することで避難開始時刻が遅延化されていると推察できる。

ただし、全体として、安全避難開始時刻に対して幾分か早く避難開始時刻が設定されている。避難基本ケースは非常に厳しい火災状況が設定されている。そのため、覚知確率の増大に伴う安全避難開始時刻の増大に対して、最遅避難時刻を見逃す可能性を抑えるためには、平均像として、安全避難開始時刻よりも早めの避難開始時刻の設定が求められると考えられる。



(a)自由避難

(b)P 最大経路

(c)P 最大経路+動的更新

対象圏域= 格子, $x_s = 3000\text{m}$ 地点, $\rho = 4.0 \times 10^{-6}$ [件/m²], $v_f = 100$ [m/h], $v_w = 2000$ [m/h], $r = 0.5\sim 1.0, 0.1$ 間隔

図 6-31 覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係

6.9 小括

本章では、第 5 章によって構築した避難開始時期決定モデルによる定まる避難開始時刻の特徴を把握するために、第 3 章で構築したリアルタイム避難誘導シミュレーションを自由避難及び火災状況に合わせた避難開始時刻の変更を行うように拡張した。その後、火災リスクが一樣な格子状市街地を対象としたシミュレーション実験を行い、本研究の避難開始時期決定モデルによる見逃しリスク低減効果について検証を行った。

第一に、リアルタイム避難誘導に必要な事前評価として最遅避難時刻の確率分布及び最遅避難時刻比と避難成功率の関係について、2 つの基本ケースの特徴と各パラメータとの関係について分析・考察を行った。結果、上側避難と下側避難において最遅避難時刻及び安全避難比に大きな差が生じること、安全避難比を規定する大きな要因として火災遭遇後の迂回しやすさの存在が示唆されたことを明らかにした。

第二に、事前評価結果をテーブル関数化した上で、様々な最遅避難閾確率に対する事前計画避難及び勧告避難の避難開始時刻について、最遅避難時刻比の分布及び安全避難比の超過率について、2 つの基本ケースの特徴について分析・考察を行った。加えて、避難開始時刻決定の適用範囲の問題として、安全避難比が 1.0 に近い場合の影響について、例を示して考察した。結果、事前計画避難と勧告避難には、最遅避難時刻比の確率分布に明確な違いがあり、固定的な事前計画避難は最遅避難時刻の確率分布に合わせて広く最遅避難時刻比が分布するのに対して、覚知火災情報を考慮した勧告避難は最遅避難時刻に応じて避難開始時刻が変動することで、比較的狭い範囲に最遅避難時刻比が分布することを示した。ただし、勧告避難は、最遅避難確率を計算するときの技術的な問題を有していることに加え、覚知火災情報が重要であり、覚知確率によって性能に大きな影響が与えられることが示唆された。また、安全避難比を基準とする本研究の避難開始時刻の設定方法の問題点として、安全避難比が 1.0 に近い場合に最遅避難時刻を見逃してしまう可能性が高くなることを示した。この問題は、不完全情報下の避難誘導における限界であり、安全避難比が 1.0 に近い場合の避難開始時刻の決定方法に関して課題が残された。

最後に、許容リスクを満たす避難開始時刻について、事前計画避難・勧告避難を組み合わせた避難によって遅延化する方法を検証した。あらゆる組み合わせの最遅避難閾確率 $\{\alpha, \beta\}$ に対する事前計画避難及び勧告避難の避難開始時刻及び避難成功率を 2 次元平面上にマッピングし、許容リスクを満たす最遅避難閾確率 $\{\alpha^*, \beta^*\}$ の範囲を限定する方法を示した。その範囲より、最も遅い避難開始時刻を取り出すことで、リアルタイム避難誘導において遅延化された許容リスクを満たす避難開始時刻を特定する方法を示した。以上の方法によって、事前計画避難および勧告避難が避難開始時刻の決定にどのように機能しているのかについて、2 つの基本ケースの特徴を考察した。その後、各パラメータと許容リスクを満たす避難開始時刻の関係について分析・考察を行った。結果、覚知火災情報によってミニマルパスが変動し最遅避難確率が十分に評価できる場合、固定的な事前計画避難を補助するように勧告避難を適用することで、事前計画避難においてより大きな最遅避難閾確率を設定することで、避難開始時刻の遅延化を図れることを示した。

本章の分析は、事前計画避難及び勧告避難による避難開始時刻の特性を詳細に把握する

というより、リアルタイム避難誘導における避難開始時刻の遅延化のために、評価実験を重ねる過程で得られる結果について、検証・特徴の概観に留まった。その中には、安全避難比を規定する要因や勧告避難が上手く機能しなかったケース、上述の高い安全避難比設定による問題等、地震火災時の不完全情報を取り巻く多くの問題が散見されたが、考えられる原因について考察するにとどまっている。今後、こうした課題が生じるメカニズムについてより詳細な分析が必要である。

第7章

大井競馬場・しながわ区民公園一帯を対象とした
避難開始時期決定モデルのケーススタディ

第7章 大井競馬場・しながわ区民公園一帯を対象とした避難開始時期決定モデルのケーススタディ

7.1 本章の目的と構成

本章では、第5章で検討した避難開始時期決定方法について、不均質な実市街地を対象として、避難開始時期決定モデルによる見逃しリスクの低減効果に関するケーススタディを行う。第4章と同様に、大井競馬場・しながわ区民公園一帯を対象として、中延四丁目からの避難の検証を行った。本章では、第6章で検証しなかった避難経路による効果の違いに着目して分析を行う。

本章の構成は以下のとおりである。

7.2 では、最遅避難時刻の確率分布および安全避難比に関する事前評価を行う。7.3 節において、事前計画避難および勧告避難の最遅避難時刻比の分布の特徴について考察し、7.4 節において避難誘導の頑健化を行った際の避難開始時刻の遅延効果について検証する。

7.2 避難開始時刻決定モデルのための事前評価

7.2.1 実験の目的

リアルタイム避難誘導時に、本研究の避難開始時刻決定モデルによって避難開始の判断を行うには、最遅避難時刻の確率分布および安全避難比について事前に評価しておく必要がある。そこで、7.2.3 では、最遅避難時刻の確率分布をモンテカルロ法によって求める。また、7.2.4 では、6.2 節で示したリアルタイム避難誘導シミュレーションにおける避難開始時刻に、各試行の最遅避難時刻に対して任意の最遅避難時刻比を設定したシミュレーションを実施し、避難成功率と最遅避難時刻比の関係を求める。

7.2.2 実験条件

表 7-1 に実験条件を示す。第 4 章において避難開始時刻の遅れに伴い避難可能確率の低下がみられた中延四丁目を対象として実験を行う。基本的に、第 4 章で設定した条件と同様だが、最遅避難時刻の確率分布及び安全避難比は、今後のシミュレーションのパラメータとして利用するため、十分ばらつきが小さくなる回数の実施が必要である。そこで、最遅避難時刻に関しては 10000 回、最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移の分析については、2000 回の試行を行った。

表 7-1 実験条件

カテゴリ	パラメータ	値
市街地モデル	対象圏域	大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域
	x_s	中延四丁目
	風速	8 [m/h]
地震火災シミュレーション	ρ	3.0×10^{-6} [件/m ²]
	v_f	100 [m/h]
覚知情報シミュレーション	r	0.5, 0.7, 0.9, 1.0
	Δt	0.1[h]
避難行動シミュレーション	v_w	2000 [m/h]
試行回数	最遅避難	10000 回
	安全避難比	2000 回

7.2.3 事前計画避難時刻のための最遅避難時刻の確率分布

まず、事前計画避難時刻を設定するための最遅避難時刻の確率分布の評価を行う。図 7-1 及び図 7-2 に中延四丁目における最遅避難時刻の累積分布を、表 7-2 に基本統計量を示す。上側避難率は 0.381 である。このことから、中延四丁目は、避難場所に対して開けた避難の方が、可能性が高いことがわかる。しかしながら、その差は 0.2 と僅差であり、上側避難によって火災を横切る避難が強えられる可能性も相当高い。

最遅避難時刻の期待値は、全体で 4 時間後、下側避難 3.5 時間後、上側避難で 4.7 時間後となっており、避難限界まで 4 時間前後の猶予があると言える。また、中央値と期待値は同程度であり、大きく偏った分布ではないが、99 パーセンタイル値がいずれも 8 時間後あたりであることから、出火点の配置によっては避難限界まで非常に大きな猶予があると言える。

下側避難と上側避難を比較すると、期待値で 1 時間程度、1 パーセンタイル値は、下側避難で 2 時間と大きな時間差があり、下側避難の方が早く最遅避難時刻を迎える。下側避難は、避難開始地点の後方で発生した火災によって、避難開始地点またはその付近がきっかけとなって最遅避難時刻を迎えるため、避難ネットワークの途絶を待たずして最遅避難を迎えやすい。一方、上側避難では、避難者の前方の避難ネットワークにおいて避難開始地点から避難場所までの経路がすべて途絶するまで時間がかかるため、最遅避難時刻まで猶予がある。しかしながら、99 パーセンタイル値では、上下の差は 0.6 時間であり、上述の差に比べて小さくなっている。本研究では、下側避難と上側避難の二値によって、出火点の配置を分類している。そのため、避難者の前方の火災による避難ネットワークの途絶と後方の火災の接近が同時期である場合、下側避難に分類されるものの、猶予時間があり、上側避難と同様に火災を横切る避難が強えられることが考えられる。

以上より、上側避難の最遅避難時刻は、前方の火災によって避難ネットワークが途絶する時期を示している。一方、上側避難よりも早期に向かえる下側避難においては、前方の火災によって避難ネットワークが途絶する前に、切迫避難によって避難を開始できると考える。そこで、上側避難における最遅避難時刻の確率分布に事前計画避難を合わせることで、安全に避難が可能となると考えられる。

表 7-2 最遅避難時刻の確率分布に関する基本統計量

		下側避難	上側避難	全体
上側避難率		0.381		
最遅避難時刻 [h]	期待値	3.5	4.7	4.0
	中央値	3.3	4.6	3.9
	1 パーセンタイル値	0.7	2.7	0.9
	99 パーセンタイル値	7.5	8.1	8.0
	標準偏差	2.1	1.3	2.3

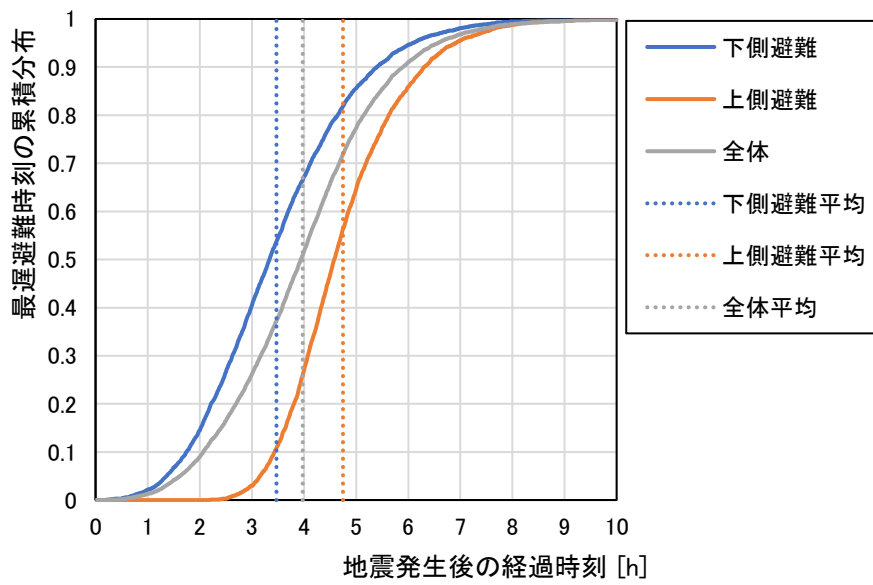


図 7-1 地震発生後の経過時刻に対する最遅避難時刻の累積分布

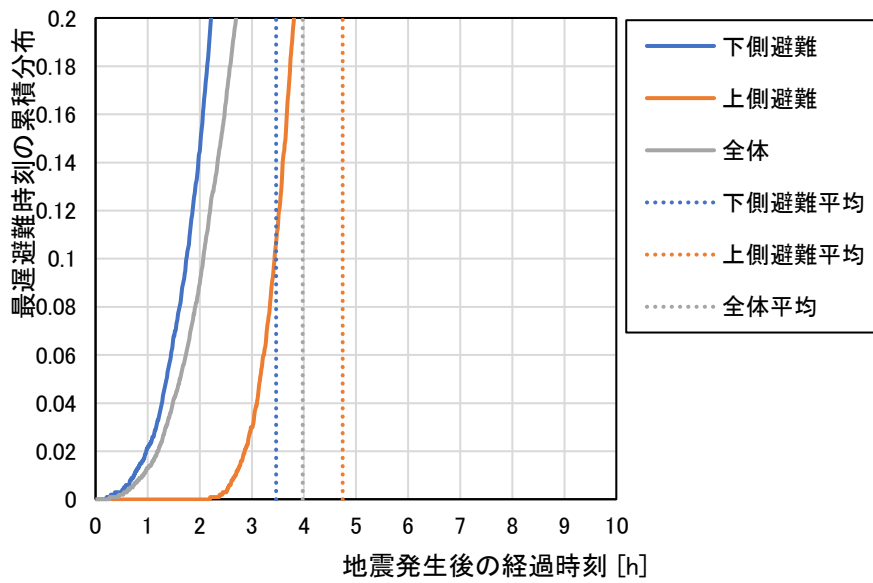


図 7-2 地震発生後の経過時刻に対する最遅避難時刻の累積分布 ($\rho \leq 0.2$)

7.2.4 避難経路規範別の安全避難開始時刻の比較

次に、避難経路別の安全避難比について評価を行う。各シミュレーション開始時に、避難者の避難開始時刻に最遅避難時刻に対する任意の最遅避難時刻比の避難開始時刻を設定し、避難成功率を評価した。

a) 覚知確率 0.7 のケースによる評価

はじめに、覚知確率 0.7 のケースを例として安全避難比について評価を行い、その特徴について考察する。図 7-3 から図 7-8 に、最遅避難時刻比に対する避難成功率を示す(全体：図 7-3, 図 7-4。下側避難：図 7-5, 図 7-6。上側避難：図 7-7, 図 7-8)。第 4 章までに検証した P 最大経路, M*-P 最大経路, 比較のためリアルタイム避難誘導による避難経路に頼らない自由経路を避難経路規範について比較を行う。なお、「M*(・)-P 最大経路」のカッコ内・は必要余裕性を示している。

まず、全体の結果に着目すると(図 7-3・図 7-4)、本実験では、必ず最遅避難時刻よりも早くに避難を開始するため経路が存在しない状態での避難は生じない。しかしながら、最遅避難時刻比が大きくなるほど、避難成功率は低下している。特に、「最遅避難時刻比=1.0(最遅避難時刻における避難開始)」では、自由経路で 0.5 以下、P 最大経路で 0.6 程度である。これは、避難者がたどった経路が最遅避難経路と一致する確率とも言える。このように、最遅避難時刻以前の避難開始であったとしても、避難場所に辿りつけられない状況が存在する。下側避難(図 7-5, 図 7-6)及び上側避難(図 7-7, 図 7-8)を比較すると、下側避難の方が、避難成功率は高く、最遅避難時刻比に対して緩やかに低下している。下側避難は、周辺の地点に移動することで、最遅避難時刻が延長される出火点の配置である。したがって、「最遅避難時刻比=1.0」の場合にも、避難ネットワークは途絶しては無く、ある程度、自由に避難経路を選択できると考えられる。

本研究では、最遅避難時刻比の増加に伴い、低下する避難成功率がある許容値を満たす最遅避難時刻比の限界値を安全避難比として、避難開始時刻の決定に用いる。この安全避難比を、避難経路規範別にまとめたものを表 7-3 に示す。表より、P 最大経路および M*-P 最大経路そして動的更新によって、自由経路と比較して安全避難比が大きくなることがわかる。しかしながら、「許容リスク=0.01」の場合、最遅避難時刻の半分よりも早くに避難しなければならないことがわかる。それゆえに、一見、経路が残されているような早期の段階において避難開始することが、逃げ惑いに対して重要であると言える。

表 7-3 避難経路規範別の安全避難比(覚知確率=0.7)

避難誘導規範		許容リスク $p^* = 0.01$			許容リスク $p^* = 0.05$		
選択経路	動的更新	下側避難	上側避難	全体	下側避難	上側避難	全体
自由避難		0.21	0.15	0.18	0.48	0.38	0.40
P 最大経路	なし	0.38	0.30	0.31	0.64	0.50	0.55
	あり	0.40	0.30	0.32	0.63	0.51	0.56
M*(0.5) -P 最大経路	なし	0.38	0.30	0.31	0.71	0.49	0.58
	あり	0.41	0.31	0.35	0.71	0.50	0.59
M*(1.0) -P 最大経路	なし	0.33	0.30	0.31	0.68	0.48	0.55
	あり	0.44	0.31	0.32	0.68	0.49	0.57

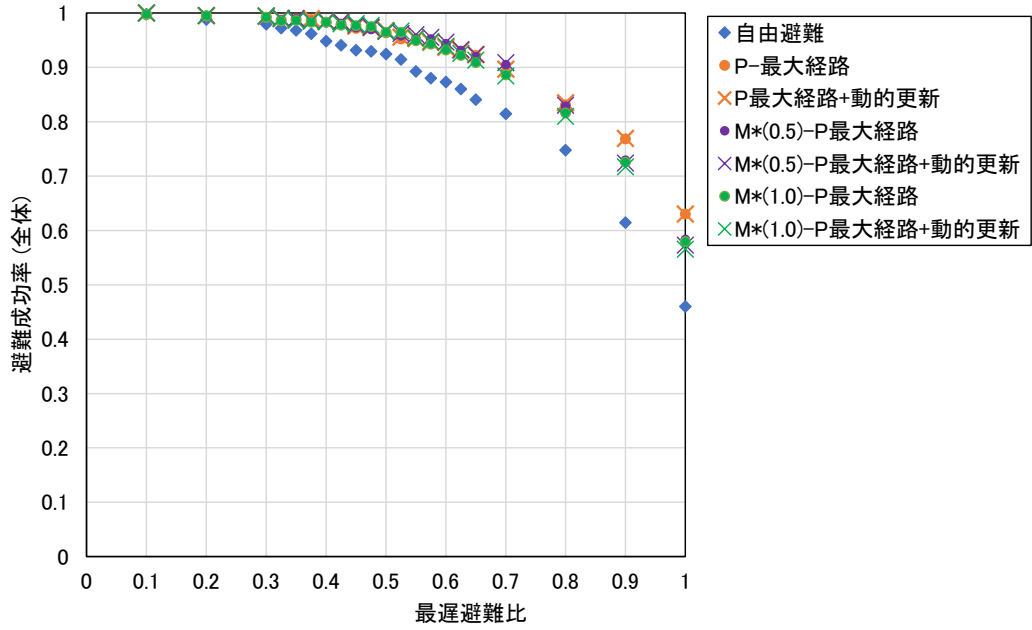


図 7-3 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移 (覚知確率=0.7, 全体)

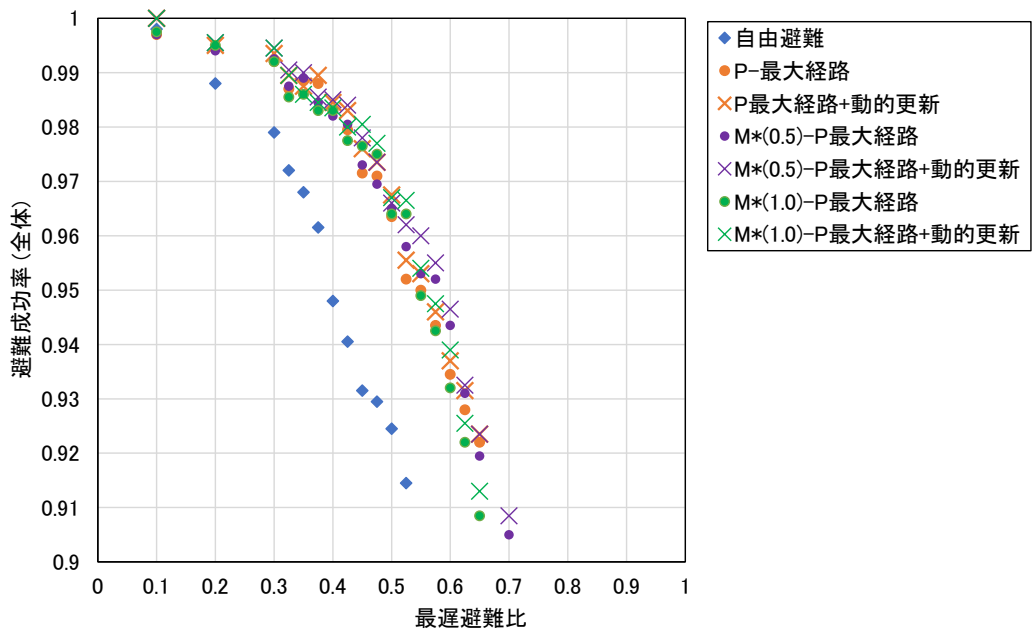


図 7-4 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移 (覚知確率=0.7, 全体, 避難成功率 \geq 0.9)

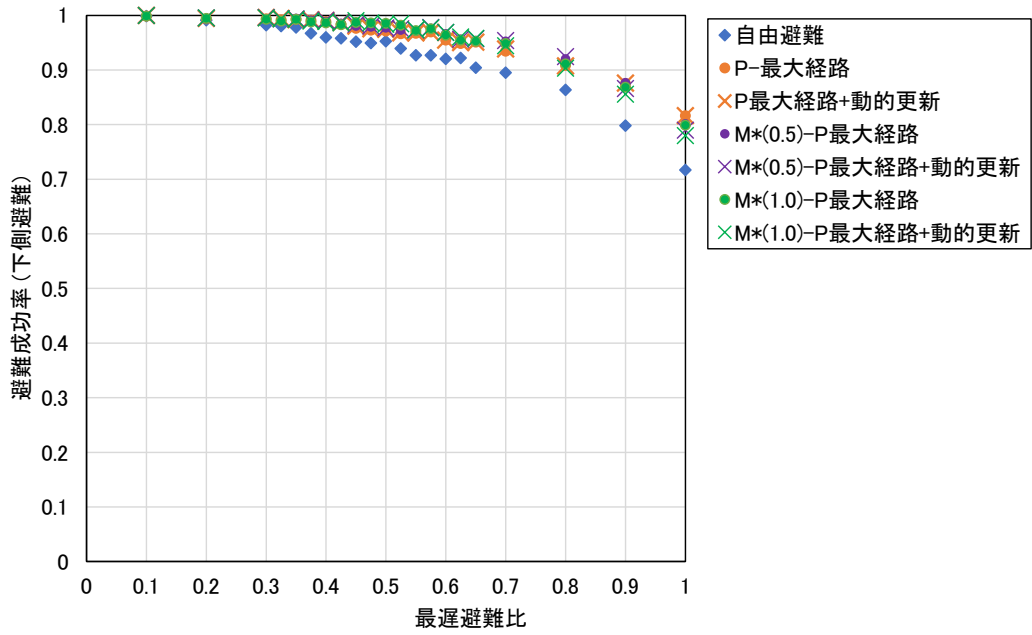


図 7-5 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移 (覚知確率=0.7, 下側避難)

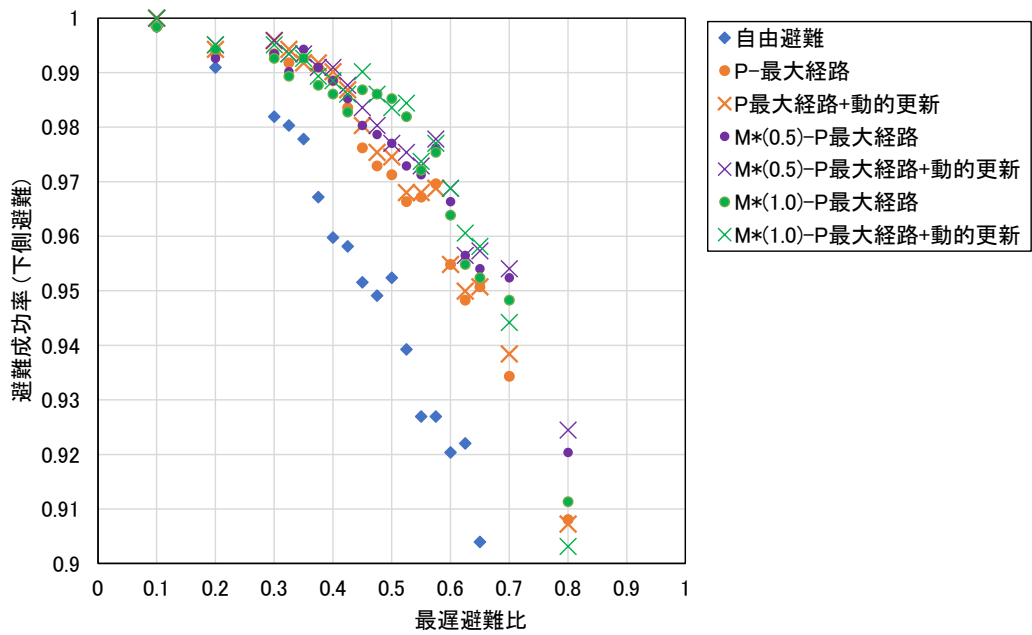


図 7-6 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移 (覚知確率=0.7, 下側避難, 避難成功率 ≥ 0.9)

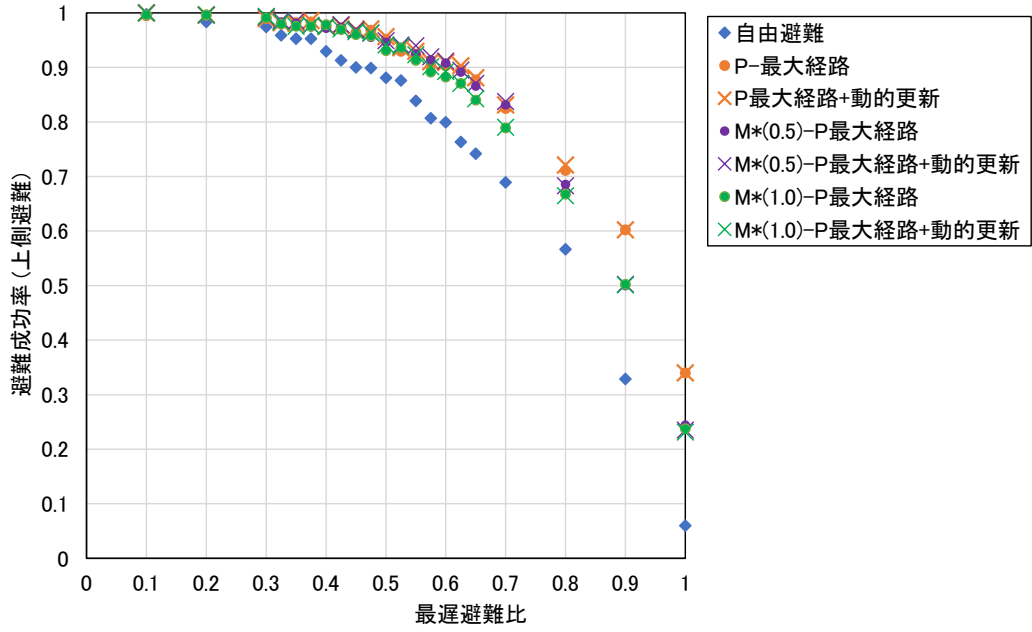


図 7-7 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移 (覚知確率=0.7, 上側避難)

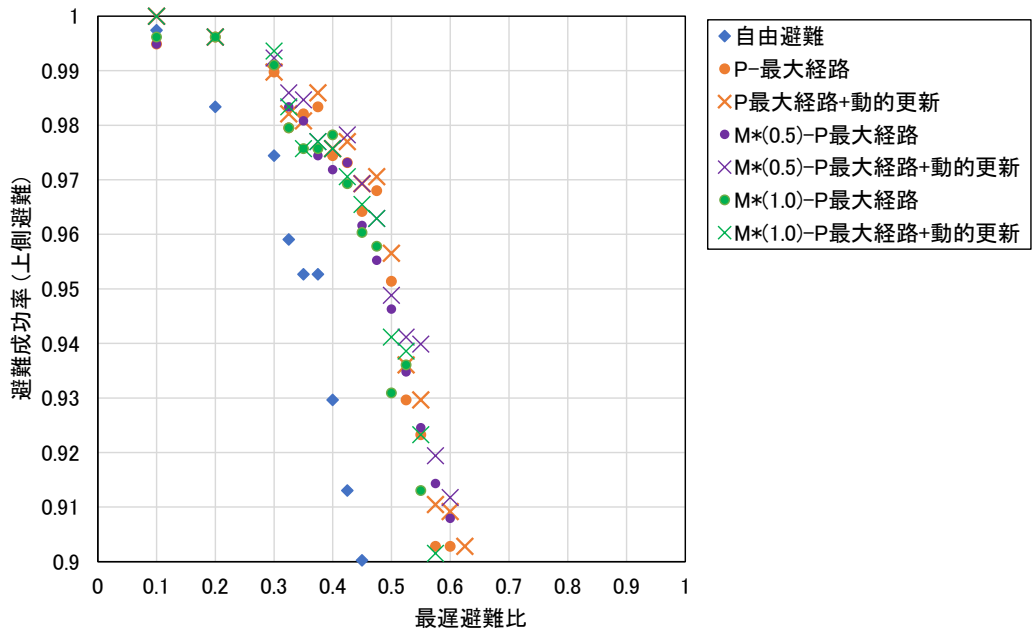


図 7-8 最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移 (覚知確率=0.7, 上側避難, 避難成功率 ≥ 0.9)

b) 覚知確率による安全避難比の比較

次に、覚知確率に対する安全避難比の推移を評価する。図 7-9 から図 7-14 に、避難経路規範別・覚知確率に対する安全避難比の推移を示す。覚知確率が高くなるほど、安全避難比も高くなる傾向が見られる。また、動的更新による安全避難比の向上は、覚知確率が高いほど顕著である。これは、火災に遭遇せずに避難場所に到達できる可能性が高くなる、もしくは、火災に遭遇するまでの時間が延長されることで、避難誘導を頼りに避難を継続し、避難場所への到達可能性が高くなることを意味している。特に、覚知確率=1.0 の場合、許容リスクが 0.05 であれば、安全避難比は 1.0 に近く、最遅避難時刻とほぼ同時に避難を開始できることがわかる。

c) 避難誘導において目標とする安全避難比

安全避難比は、上側避難と下側避難において、大きな差がある。実際のリアルタイム避難誘導では、全ての火災を覚知できているわけではないため、その出火点の配置が上側避難か否かはわからない。そのため、下側避難の安全避難比で避難開始した場合、実際の出火点の配置が上側避難であれば、許容リスクを満たすことができない。そこで、リアルタイム避難誘導では、その地点において、常に上側避難を想定して安全避難比を設定する。実際の出火点の配置が下側避難の場合、安全避難比よりも早く避難開始してしまうことになるが、いずれの出火点配置でも安全避難比を担保することが期待できる。

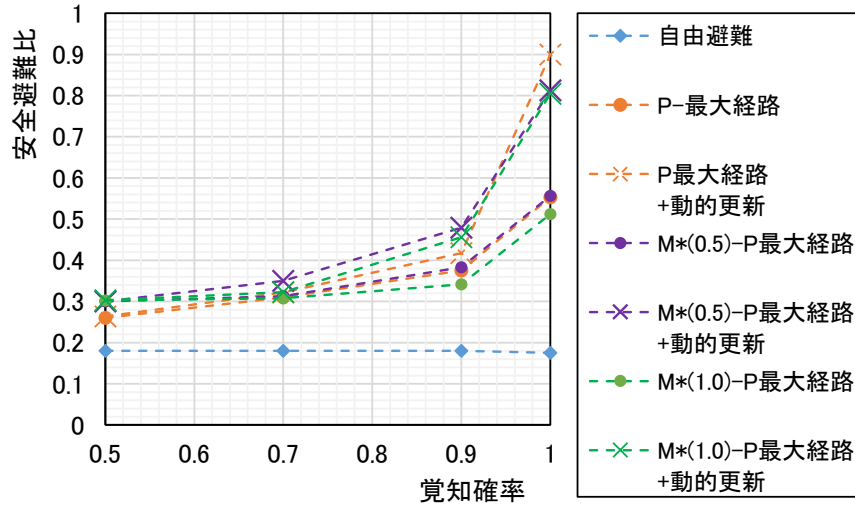


図 7-9 覚知確率に対する安全避難比の推移(全体, 許容リスク=0.01)

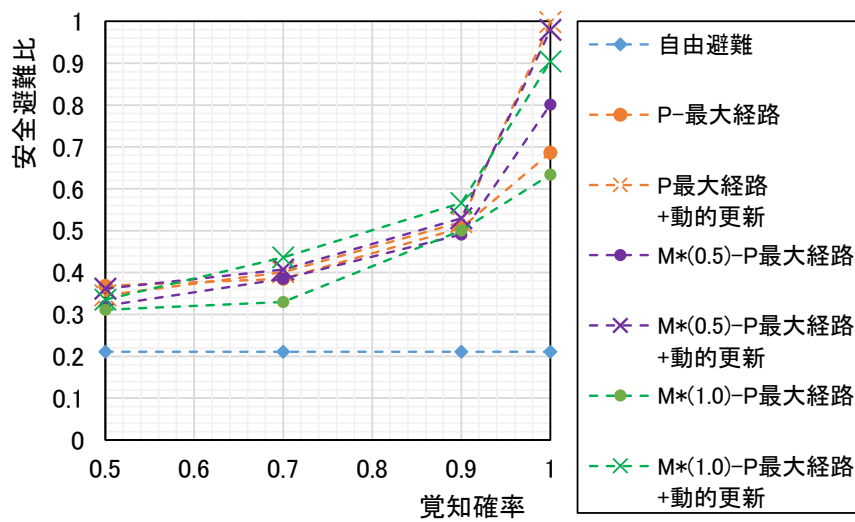


図 7-10 覚知確率に対する安全避難比の推移(下側避難, 許容リスク=0.01)

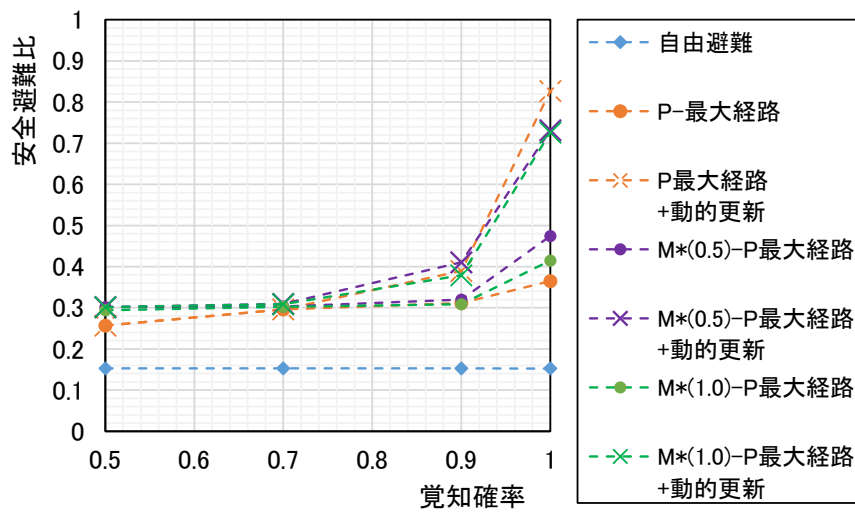


図 7-11 覚知確率に対する安全避難比の推移(上側避難, 許容リスク=0.01)

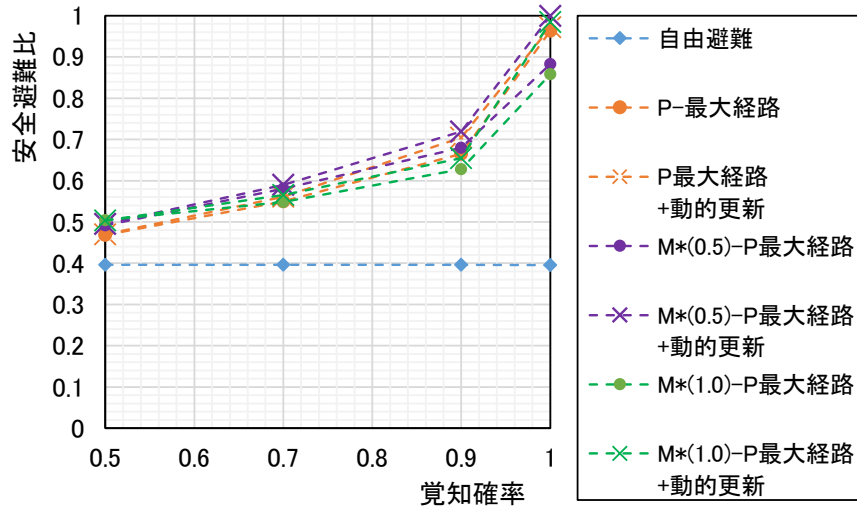


図 7-12 覚知確率に対する安全避難比の推移(全体, 許容リスク=0.05)

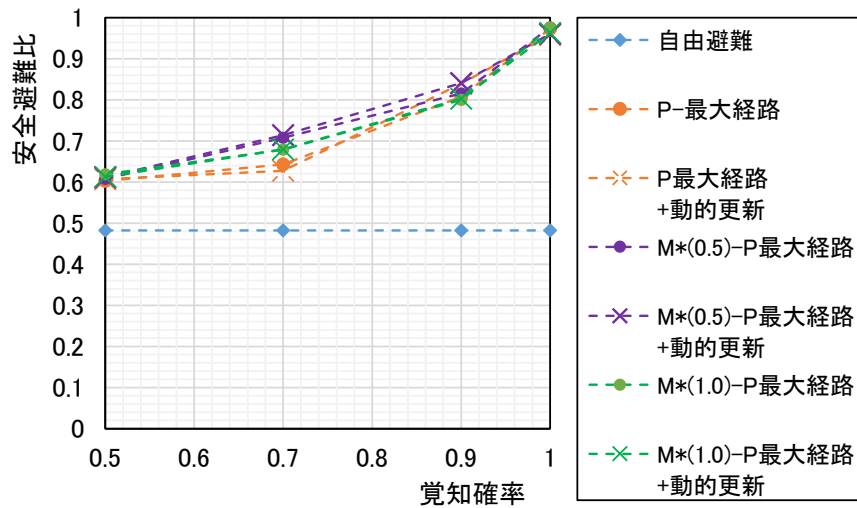


図 7-13 覚知確率に対する安全避難比の推移(下側避難, 許容リスク=0.05)

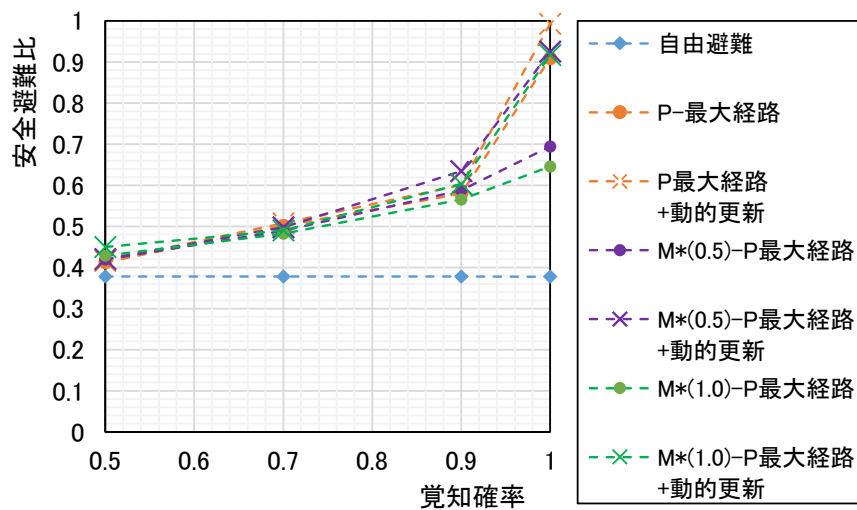


図 7-14 覚知確率に対する安全避難比の推移(上側避難, 許容リスク=0.05)

7.3 避難開始時期決定モデルにおける最遅避難時刻比の特徴

7.3.1 実験の目的

本節では、実際に避難開始時刻決定モデルによって決定される避難開始時刻の最遅避難時刻比の特徴を調べるために、最遅避難閾確率を 0.05 から 0.9 まで推移させ事前計画避難および勧告避難による避難誘導シミュレーションを実施した。シミュレーション結果を用いて、その避難開始時刻における安全避難比の超過率および最遅避難時刻比の確率分布を評価した。

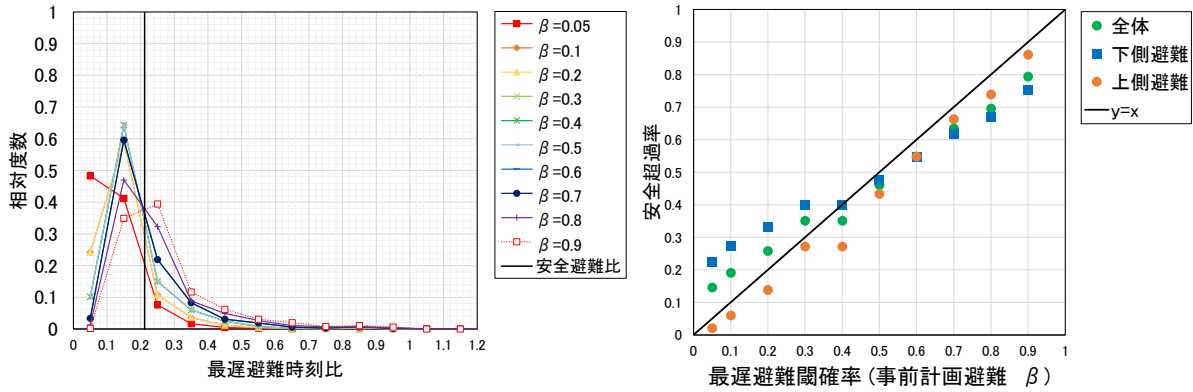
7.3.2 実験条件

本実験では、前節で評価した最遅避難開始時刻の確率分布および安全避難比を用いて、事前計画避難および勧告避難による避難開始時刻の評価実験を行う。事前計画及び勧告避難について、最遅避難閾確率を 0.05 から 1.0 まで段階的に変化させ、それぞれの避難成功率に関するモンテカルロシミュレーションを実施した。試行回数は、収束性と計算時間を考慮し、2000 回とした。なお、7.3 も同条件で実験を行っている。

7.3.3 事前計画避難における最遅避難時刻比の特徴

まず、事前計画避難における最遅避難時刻比の特徴について考察する。図 7-15 から図 7-17 に、自由避難及び P 最大経路における、最遅避難時刻比の分布と計画見逃し率に対する安全避難比の超過率を示す。各図の左側に、全体のサンプルにおける最遅避難時刻比の密度分布(横軸の数字は、各区分の上限値)を示し、右側に最遅避難閾確率に対する安全避難比の超過率を示している。事前計画避難では避難開始時刻が固定されるため、切迫避難にならない限り、最遅避難時刻の分布によって安定して最遅避難時刻比が決定する。本研究では、上側避難に合わせた最遅避難閾確率に対する避難開始時刻を決定しているため、上側避難における超過率と最遅避難閾確率が一致している(各図右側、橙色のプロット)。また、最遅避難閾確率が大きくなるほど、最遅避難時刻比の分布は、1 の方へ移動し、そのばらつきも大きくなる傾向がみられる(各図左側)。自由避難と P 最大経路を比較すると、P 最大経路の方が安全避難比は大きいため、より 1 の方に最遅避難時刻比が分布している。安全避難比が大きいほど、最遅避難時刻に近い時刻に避難を開始するためである。特に、P 最大経路では 0.9 から 1.0 における最遅避難時刻比の頻度が高いことがわかる。これは、見切り難時刻を遅い時刻に設定することで、事前計画避難における避難開始時刻を待たずして切迫避難となる、もしくは、最遅避難時刻付近における避難に陥ることを示している。

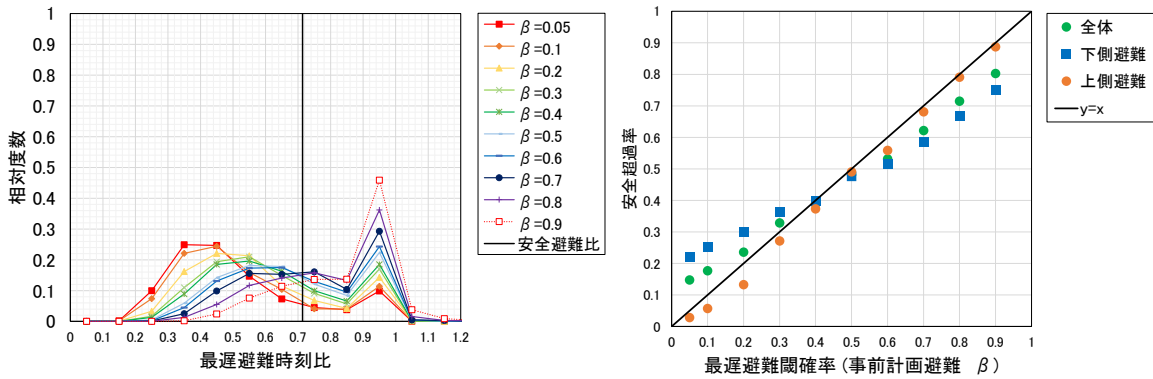
7.3 避難開始時期決定モデルにおける最遅避難時刻比の特徴



(a) 最遅避難時刻比の相対度数(全体)

(b) 安全超過率

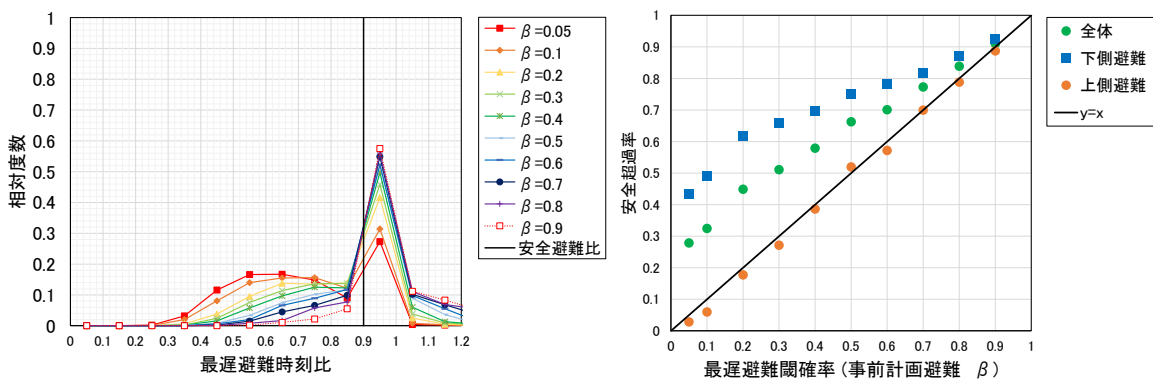
図 7-15 事前計画避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.21)



(a) 最遅避難時刻比の相対度数(全体)

(b) 安全超過率

図 7-16 事前計画避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.71)



(a) 最遅避難時刻比の相対度数(全体)

(b) 安全超過率

図 7-17 事前計画避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.90)

7.3.4 勧告避難における最遅避難時刻比の特徴

次に、勧告避難における最遅避難時刻比の特徴を分析する。格子状市街地における検証と同様に、勧告避難特有の最遅避難時刻比の分布性状と共に技術的な限界が確認できた。

a) 最遅避難時刻比の特徴

図 7-18 から図 7-20 に、覚知確率が 0.7 から 1.0 までの異なる安全避難比の最遅避難時刻比の分布と計画見逃し率に対する安全避難比の超過率を示す。第 6 章で行った格子状市街地における分析と同様な結果として、

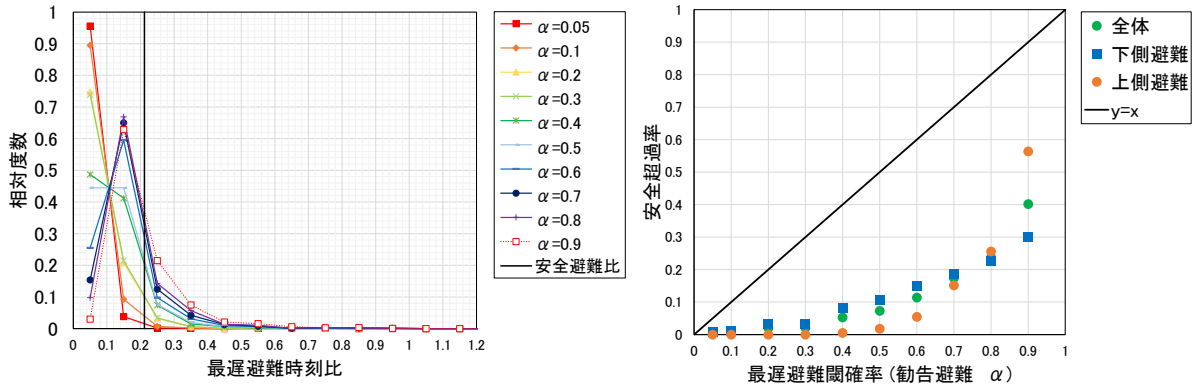
- (1)安全避難比付近にピークを持ち、狭い分布をしていること
- (2)上側避難に焦点を当てているため、下側避難において最遅避難閾確率に対して低い安全超過率で停滞していること
- (3)ミニマルパスセットの探索が不安定であるため、最遅避難閾確率と安全超過率の関係が対角線上にプロットされないことが確認できる。

一方で、格子状市街地と異なる特徴として、覚知確率が高いケース(覚知確率=1.0, 図 7-20)において、最遅避難閾確率が 0.5 を超えたあたりから、最遅避難時刻比の分布に大きな変化が見られなくなったことが確認できる。実市街地の場合、火災リスクや道路の粗密が不均質であるため、道路の閉塞可能性には偏りがある。そのため、覚知火災情報が充実し道路閉塞の検出確度の高いケースでは、時間経過に伴い候補となるミニマルパスが固定のパスに収束していくと考えられる。その限られた固定的なミニマルパスに対して最遅避難確率の計算がされるため、ある経過時刻以降は最遅避難確率の推移が出火パターンに寄らず一意に収束すると考えられる。したがって、経過時刻に対して殆ど同時期に最遅避難確率が 0.5 を迎えることになり、最遅避難閾確率によらず、ある固定時刻が勧告避難の決定時刻の上限となっていることが考えられる。

b) 勧告避難の決定判断における限界

勧告避難のための連結信頼性の評価において、試行錯誤的にミニマルパスセットを構築しているため、事前計画避難と同様な最遅避難閾確率に対する精度を有していない。その原因として、(1)ミニマルパスセットが十分な数発見できないこと、(2)道路リンクの信頼性に避難可能確率を直接適用しており、(2)-1:実市街地の通行不能領域の有限領域に対応できないこと、(2)-2:覚知火災によって安全避難開始時刻が検出される可能性及び覚知火災による道路閉塞までの猶予時間が考慮されていないことが挙げられる。本研究のモデルでは、時間経過に伴い道路閉塞が生じる中で経路を探索するため、時刻によって経路の探索可能性は異なる。一方、手法自体はどの時刻帯でも同様な手法を用いているため、時間経過に伴い、必要なミニマルパスセットが得られなかったと考えられる。

7.3 避難開始時期決定モデルにおける最遅避難時刻比の特徴

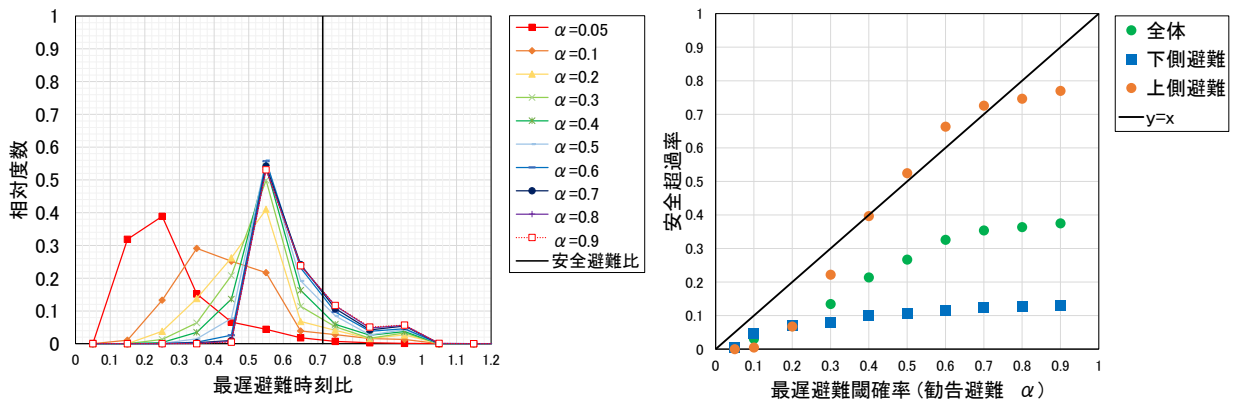


(a) 最遅避難時刻比の相対度数(全体)

(b) 安全超過率

$r = 0.7, p^* = 0.01$, 誘導経路規範=自由避難

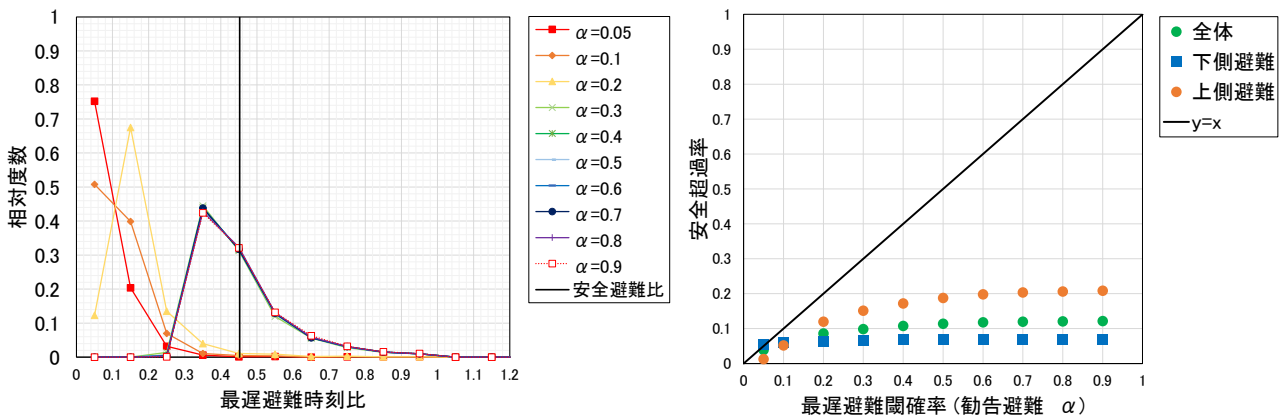
図 7-18 勧告避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.21, 覚知確率=0.7)



(a) 最遅避難時刻比の相対度数(全体)

(b) 安全超過率

図 7-19 勧告避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.71, 覚知確率=0.9)



(a) 最遅避難時刻比の相対度数(全体)

(b) 安全超過率

図 7-20 勧告避難における最遅避難時刻比(安全避難比=0.90, 覚知確率=1.0)

7.4 許容リスクを満たす避難開始時刻の遅延化の検証

前節までの事前分析に基づき、許容リスクを満たす避難開始時刻の遅延化を行う。はじめに、許容リスクを満たす避難開始時刻(中央値)について、覚知確率別に誘導経路規範別の比較を行う。次に、比較対象を変更し、避難経路規範別に覚知確率に対する遅延化された避難開始時刻の推移を示す。ただし、第6章で得られた問題、安全避難比1.0に近い時に最遅避難時刻を見逃す可能性が高くなることから、設定する安全避難比の上限は0.9とした。

7.4.1 実験の目的と条件

本節では、事前計画避難及び勧告避難によって、許容リスクの避難開始時刻の遅延化に関する検証を行う。ここで、遅延化とは、目標時刻である安全避難開始時刻に対してどの程度の時刻で避難開始できるかであり、なるべく遅く避難開始できることで、初期消火活動や避難準備等の確保において意義がある。

許容リスクを満たす避難開始時刻は、6.8節で示したマップへの可視化及び許容リスク前後の避難成功率における避難開始時刻の線形補間によって求めた。なお、許容リスクを満たす遅延化された避難開始時刻の算出において利用した避難開始時刻-避難成功率マップを付録に添付する。本研究の結果を理解する上での参考とされたい。また、実験条件は7.3.2と同じであるため、そちらを参照されたい。

7.4.2 避難経路規範による比較

図 7-21 から図 7-24 に、許容リスクに対して遅延化された避難開始時刻を示す。6.8 節と同様に、横軸は地震発生後の経過時刻を示しており、縦軸に動的誘導経路の避難経路規範を並べている。全体として、事前計画避難・勧告避難・リアルタイム避難(事前計画避難+勧告避難)のいずれかによって、安全避難開始時刻前後での避難開始が概ね実現されている。

まず、自由避難に着目すると、その他の避難経路に対して、著しく避難開始時刻が早く設定されることがわかる。これは、格子状市街地においても確認できたが、より顕著な差が生じている。最短経路(格子状市街地の P 最大経路)と自由避難の違いは目の前の火災以外にも避けるか否かの違いであるのに対して、実市街地における P 最大経路では、火災リスクの高い地域を避ける効果が付加されることが自由避難と誘導経路に顕著な差が生じている理由と考えられる。したがって、覚知確率が高くなるほど、自由避難と誘導経路の差が広がっている。

次に、動的更新の有無に着目すると、覚知確率が比較的に低いケース(覚知確率=0.5,0.7)では、動的更新の有無による差は見られない。動的更新の差は、覚知確率が 0.9 で僅かにみられ、動的更新によってより避難開始時刻が遅延化されている。

最後に、必要余裕性の確保に関する影響に着目すると、覚知確率が高いケース(覚知確率=1.0)になるほど、遅延化された避難開始時刻が早まっていることが確認できる。覚知確率が高いケースでは、多くの覚知火災に対して避難余裕性を確保するような経路を更新し続けるため、遅延化された避難開始時刻も早める必要があると考えられる。

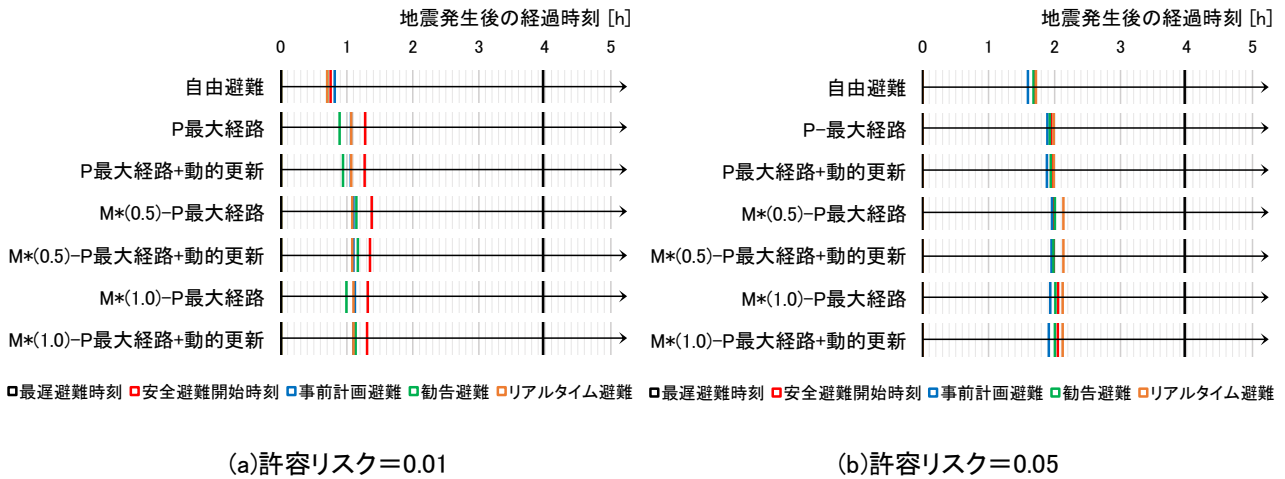


図 7-21 許容リスクを満たす避難開始時刻(覚知確率=0.5)

7.4 許容リスクを満たす避難開始時刻の遅延化の検証

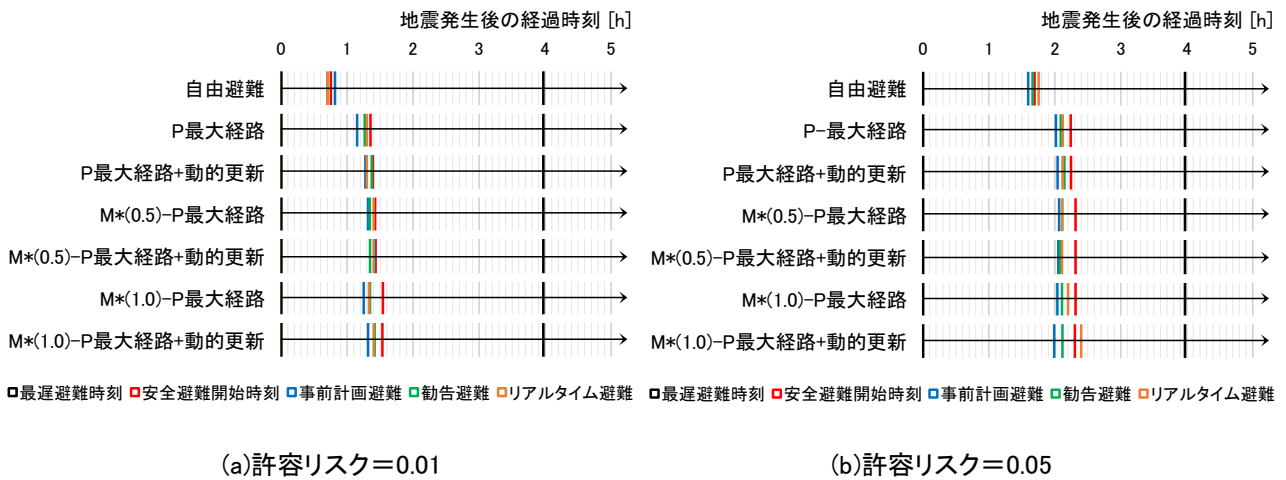


図 7-22 許容リスクを満たす避難開始時刻 (覚知確率=0.7)

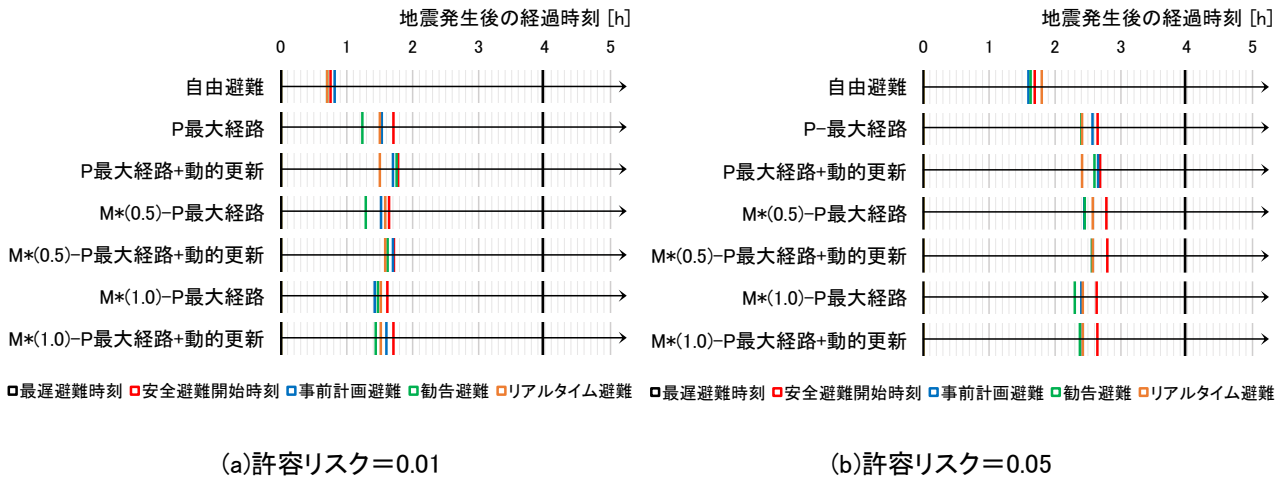


図 7-23 許容リスクを満たす避難開始時刻 (覚知確率=0.9)

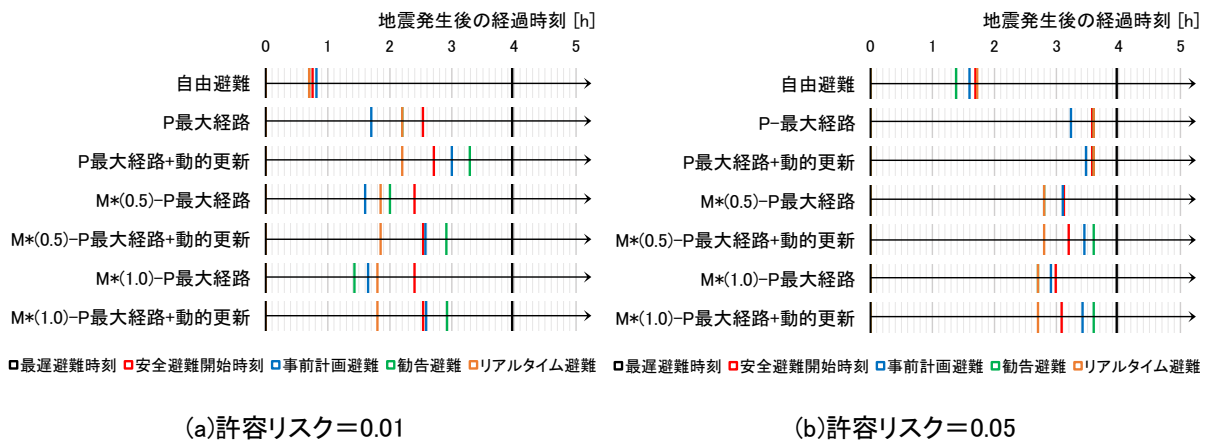


図 7-24 許容リスクを満たす避難開始時刻 (覚知確率=1.0)

7.4.3 覚知確率による比較

図 7-25 から図 7-28 に、覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻(中央値)の関係を示す(図 7-25:自由避難, 図 7-26・図 7-27・図 7-28:左に動的更新なし, 右に動的更新有り). 結果として, 自由避難と誘導経路に明確な違いがみられる.

a) 切迫避難に対する避難開始時期決定モデルの優位性

まず, 避難開始時期決定モデルを適用しない切迫避難に着目する(各図, 紫線). 切迫避難の避難開始時刻は, 最遅避難時刻よりも後方に存在しており, 地震火災の状況や事前リスクに基づいて何らかの見切りを付けなければ, 非常に危険であることがわかる. 切迫避難に陥った場合の避難不能率(1-避難成功率)は自由避難の場合, 0.5 を超えており, あらゆる出火パターンのうち半数において, 中延四丁目から大井競馬場へ向かう避難は逃げ惑いに陥るといえる. 一方, P 最大経路やその他の動的誘導経路を適用した場合, 覚知確率の向上に応じて避難不能率が低下するものの, 下限は 0.4 程度であり, 動的誘導経路のみでは安全性に限界がある, 前項でも確認したように, 避難開始時期決定モデルを適用することで, 許容リスクを満たすような安全避難開始時刻付近での避難が可能であり, 事前計画避難または勧告避難によって, 火災の接近以外の外的な要因で避難開始を促すことの優位性が確認される.

b) 避難開始時期決定モデルによる避難開始時刻の遅延化

次に, 避難開始時期決定モデルを適用した場合に着目する. 自由避難の場合(図 7-25), 覚知確率の向上に関わらず, 避難開始時刻は殆ど一定である. 自由避難では, 安全避難比が非常に小さい値が設定される. 本研究のケースでは, 最遅避難時刻が 4 時間後であるのに対して安全避難開始時刻は許容リスクが 0.01 で約 0.5 時間後, 許容リスクが 0.05 で約 1.7 時間後である. 地震発生直後は, たとえ覚知確率が高くても時間遅れの出火のリスクが大きいので, 不完全情報下の不確実性が高い状態で避難誘導が必要となる. したがって, 許容リスクが 0.01 の場合, 事前計画避難による避難開始時刻の設定が最も遅延されている. 一方, 許容リスクが 0.05 の場合, 火災情報が充足し始める段階であるため, 勧告避難・リアルタイム避難が最も遅延化されている.

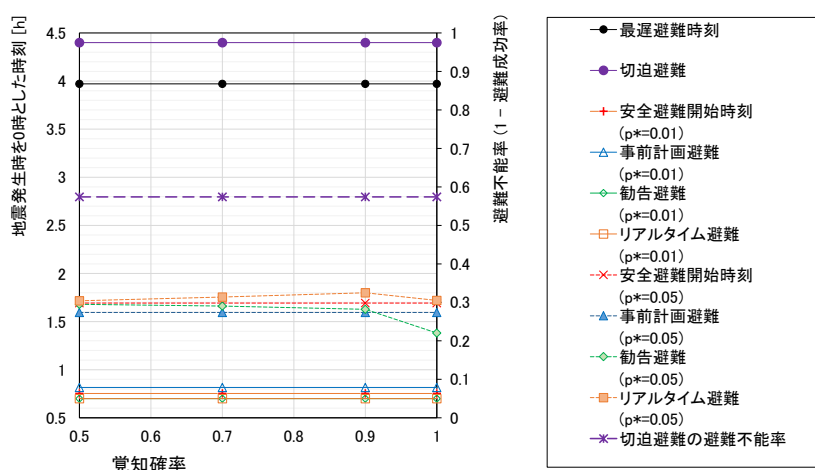


図 7-25 覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係(自由避難)

7.4 許容リスクを満たす避難開始時刻の遅延化の検証

次に、P 最大経路(図 7-26)に着目すると、覚知確率の向上に伴い、避難開始時刻が遅延化されている傾向が確認できる。また、多くの場合において、より遅延化されている避難開始時期は勧告避難若しくはリアルタイム避難であり、覚知火災情報に合わせて避難開始時期を決定することの優位性が確認される。ただし、一部、事前計画避難の方が遅延化されているケースがみられる。それは、「覚知確率=0.5」のケースである。この場合、事前計画避難と同程度もしくは早期の避難開始時刻が設定されている。覚知確率が低い場合、少ない情報でミニマルパスセットを構築し最遅避難確率を評価するため、未覚知火災の不確実性が大きい評価となる。勧告避難の技術的に不安定な部分も考慮すると、予め事前的に固定した避難開始時刻を設けた方が、避難開始までの時間を安定して確保できると考えられる。事前計画避難と勧告避難における避難開始時刻の早遅の関係は概ね明確である一方、リアルタイム避難については、所々不規則に関係している。リアルタイム避難は、事前計画避難又は勧告避難の早い方の避難開始時刻に従う。本研究の実験条件上、どちらかがあまり機能しないケースにおいても最遅避難閾確率を最大 0.9 に設定する必要があるため、片方がもう片方の避難開始時刻の設定の足を引っ張っている可能性が示唆される。これについては、技術的な問題であることから、今後の検討課題とする。

次に、必要余裕性を確保した場合のケース(図 7-27・図 7-28)に着目すると、概ね P 最大経路で見られた特徴が確認でき、覚知確率が高いほど遅い避難開始時刻が設定され、勧告避難若しくはリアルタイム避難によってより遅延化されている。

最後に、本実験のケースにおける最遅のケースについて着目すると、覚知確率が高い(覚知確率=1.0)ケースにおける動的更新を行った場合において、地震発生から 4 時間後の最遅避難時刻に対して許容リスク 0.05 において 3.6 時間後まで遅延化されている。この許容リスクの高低については、本研究の範囲外による追加の議論が必要であるものの、十分な覚知体制及び避難誘導體制を敷くことで、限りなく最遅避難時刻に近づけることが可能であることが示唆された。

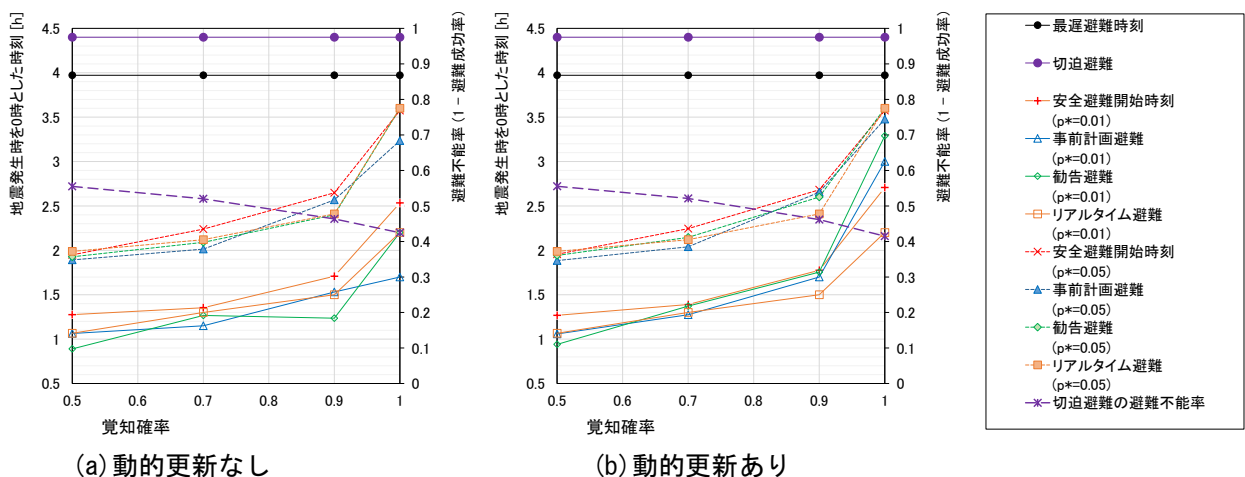


図 7-26 覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係(P 最大経路)

7.4 許容リスクを満たす避難開始時刻の遅延化の検証

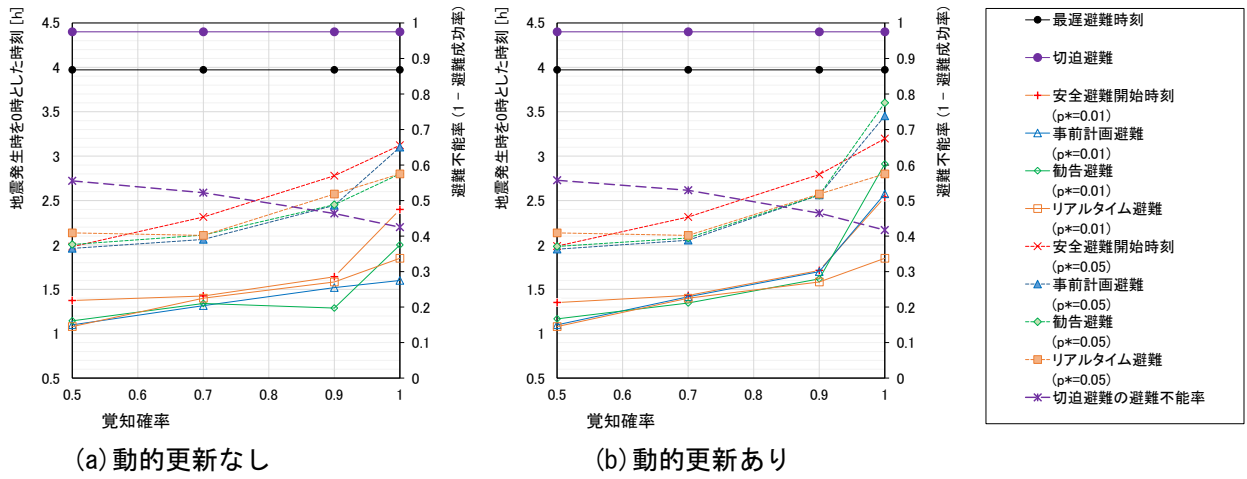


図 7-27 覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係 ($M^*(0.5)$ -P 最大経路)

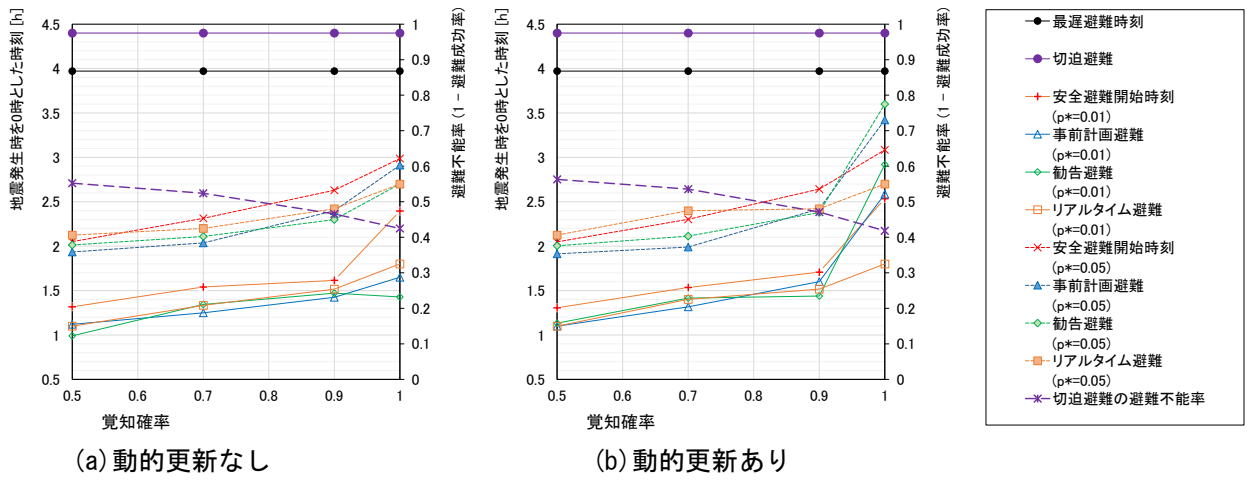


図 7-28 覚知確率と許容リスクを満たす避難開始時刻の関係 ($M^*(1.0)$ -P 最大経路)

7.5 小括

本章では、第4章で対象とした大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域について、中延4丁目の重心を避難開始地点として、本研究の避難開始時期決定モデルのケーススタディを行った。

まず、中延四丁目の最遅避難時刻分布及び誘導経路規範別の安全避難開始時刻について、事前評価を行った。地震発生から4時間程度で最遅避難時刻を迎えることを把握した。また、安全避難比は、自由避難において「許容リスク=0.01」で0.2程度、「許容リスク=0.05」で0.4程度と非常に低く、早期の避難が必要であることを確認した。一方、動的誘導経路(P最大経路, M*-P最大経路)では覚知確率に応じて安全避難比は増大し、動的更新を用いることで、1.0付近まで安全避難比を向上させることが確認された。

次に、事前計画避難および勧告避難における最遅避難時刻比の特徴について評価を行った。それぞれの最遅避難時刻比の特徴として第6章で得られた特徴と似た結果が得られた。事前計画避難では、最遅避難閾確率を大きくするほど、最遅避難時刻比が1の方にシフトし、ばらつきが大きくなる傾向がみられた。固定的な避難開始時刻を設定しているため、そのばらつきは最遅避難時刻に依存する。同様な最遅避難時刻分布に従って最遅避難閾確率及び安全避難比に従う時刻を設定しているため、安全超過率は安定しているものの、出火パターンは考慮されていなく火災状況に追従した避難開始時刻の設定と言えない。勧告避難では、覚知火災情報に基づき決定されるため、最遅避難閾確率に対してある程度ピークが一定であり、比較的ばらつきの小さい分布をしている。最遅避難確率はその時に残存する経路に対して評価されるため、覚知火災が切迫している場合には、直ちに勧告避難を開始し、覚知火災が切迫していない場合には見送るといった、火災状況に追従した避難開始時刻の決定がなされていると考えられる。一方、ミニマルパスセットの探索が不安定であり、最遅避難閾確率通りの安全超過率が得られないという技術的な問題も有している。加えて、火災リスクや道路ネットワークの粗密が不均質な実市街地では、避難可能確率による信頼性の評価・ミニマルパスセット探索の偏りによって、探索時刻や覚知確率の条件によっては、正確な評価・覚知状況に対して変動しないと推察されるミニマルパスによって、最遅避難閾確率に対する感度が落ちるといふ本研究モデルの限界が示唆された。

本研究の最後の検証として、許容リスクを満たす避難開始時刻の遅延化に関する検証を行い、誘導経路規範による比較及び覚知確率による比較を行った。

結果、以下の通り、避難開始時期決定モデルの優位性を示すことができた。第一に、避難開始時刻決定モデルを適用しない切迫避難では、動的誘導経路を用いた場合でも、避難不能率(「1-避難成功率」)が0.4程度と非常に高く、避難開始時刻決定モデルを適用し、火災の接近を待たずに避難を開始することの重要性が示された。第二に、事前計画避難及び勧告避難を組み合わせることで(事前計画避難のみ、勧告避難のみ、両者を組み合わせたりリアルタイム避難のいずれかが該当)、安全避難開始時刻と殆ど等しい時刻に避難開始時刻を設定することができた。特に、勧告避難において最遅避難確率が十分に評価できている場合には、事前計画避難よりも遅くに避難開始時刻を設定することができ、覚知火災情報に基づく避難勧告の重要性が示唆された。第三に、動的誘導経路と組み合わせることで、安全避難開始時刻が遅い時刻に設定され、それに伴い避難開始時刻も遅延化されることが確認された。特に覚知確率が高い場合、動的更新によって著しく遅延化された。

第8章 結論

8.1 本研究の結論

本研究では、地震火災時において火災情報に基づき住民を避難場所に誘導する方策であるリアルタイム避難誘導の必要性を指摘し、火災情報の不完全性による避難リスクを考慮した避難経路及び避難開始時刻決定方法を構築し、避難誘導による避難リスク低減効果と不完全情報下における限界を明らかにすることを目的とした。

本論では、誘導する避難経路における火災遭遇可能性と最遅避難時刻を限界に据えた避難開始時刻の見逃し可能性に着目し、不完全情報下の避難リスクの定性的な考察に基づき、避難リスクの評価及び低減方策について数理的なモデル化を行った。その後、シミュレーションモデルによる実験の下、モンテカルロ法によって避難誘導による避難リスクの低減効果を明らかにした。まず、章別に本論で得られた研究の成果について示す。また、各検証結果は箇条書きで示し、特に、本研究の目的であるリアルタイム避難誘導の優位性と限界については、優位性には○、技術的な課題や問題には△、限界には×を行頭文字に付することとする。

第2章 火災情報の不完全性を考慮した動的誘導経路による火災遭遇リスクに対する頑健化

本章では、誘導時の経路における火災遭遇リスクを低減するために、動的誘導経路モデルを構築した。はじめに、地震火災・火災覚知及び避難行動に関する避難誘導のシナリオを設定した。その後、不完全情報下の不確実性について「未覚知火災の存在」と覚知火災における「延焼予測のばらつき」に着目し、不完全情報下で避難誘導する場合に、こうした予期せぬ火災に遭遇するリスクについて定性的に考察した。この考察結果を基に、(1)火災に遭遇しにくい経路探索と、(2)避難完了まで常に新しい情報に基づき繰り返し経路探索を行い逐次経路変更を行う動的更新の2つの方針を立てモデル構築を行った。

経路探索モデル：「未覚知火災の存在」及び覚知火災の「延焼予測のばらつき」それぞれに対する安全性指標の検討と頑健な避難経路選択モデルを構築した。未覚知火災の存在に対しては、[石井・腰塚 1998]を応用し、未覚知火災へ遭遇せずに通過できる可能性(「避難可能確率」)を”覚知確率”と呼ぶ出火が覚知される確率によって定式化し、各リンクの避難可能確率を最大化する避難経路(「P 最大経路」)を構築した。延焼予測のばらつきに対しては、避難者が覚知火災に巻き込まれないために許される延焼速度誤差の誤差率(「避難余裕性」)によって安全性を評価し、避難余裕性が最小である地点を最大化する避難経路(「最大余裕経路」)を構築した。確率と許容誤差率という異なる指標の特性を考慮して、両指標を共に最大化する経路として、確保すべき避難余裕性(「必要余裕性」)を緩い制約条件として、避難可能確率を最大化する第三の避難経路(「M*-P 最大経路」)を構築した。

動的更新モデル：避難経路の情報伝達について、PUSH 型・PULL 型の情報伝達方法を想定し情報伝達時間を定式化した。その後、情報伝達時間を考慮しつつ、常に新しい経路かつ立ち止まることなく、一続きの避難軌跡を描くように避難経路を更新するタイミングについて検討した。

第 3 章 リアルタイム避難誘導シミュレーションによる動的誘導経路の火災遭遇リスク低減

効果の検証

本章では、避難誘導シミュレーションによって、動的誘導経路による火災遭遇リスクの低減効果を検証した。はじめに、動的誘導経路によってどの程度火災に遭遇しにくくなるのかを検証することを目的として、本研究で想定した単純な地震火災・覚知情報をコンピュータ上に再現し、動的誘導経路に従う避難者について火災への遭遇判定を行うリアルタイム避難誘導シミュレーションを構築した。次に、火災リスクが一樣な格子状市街地を対象として、最短経路による火災遭遇リスクの特徴と動的更新による火災遭遇リスクの低減効果の検証を行った。主要な検証結果について、以下に箇条書きで示す。

以下は、避難開始時に経路が発見された場合の結果であることに留意する。

- ・避難開始時の経路の避難可能確率と非火災遭遇率(「1 - 火災遭遇率」)が一致し、避難可能確率によって未覚知火災への遭遇可能性を評価できることが確認された。
- 動的更新を行い場合では、覚知確率が高いことで非火災遭遇率が高い水準で保たれ、覚知火災情報に基づく経路による火災遭遇リスクの低減効果が限定的に確認された。
- 動的更新によって、避難開始時から経路を変更しない場合と比較して非火災遭遇率が上昇し、火災遭遇リスクの低減効果が示された。
- 特に、覚知確率が 1.0 のケースでは、動的更新によって非火災遭遇率が 1.0 付近まで上昇し、避難開始時刻が遅れても 1.0 付近に保たれた。
- ×一方、覚知確率が低い場合に火災遭遇リスクの低減効果は比較的小さく、覚知確率の重要性が示唆された。

第 4 章 大井競馬場・しながわ区民公園一帯を対象とした動的誘導経路のケーススタディ

本章では、大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域を対象として、火災リスク・道路ネットワークが不均質な実市街地による動的誘導経路のケーススタディを行った。はじめに、実市街地でリアルタイム避難誘導シミュレーションを適用するために、延焼クラスに基づいて通行不能領域と呼ぶ出火・延焼が生じる領域を構築し、出火点を非耐火造建物の重心に限定して発生する実市街地モデルを構築した。

その後、避難距離及び火災リスクの異なる、中延四丁目、西大井五丁目、西大井一丁目、東大井五丁目、南大井五丁目の重心付近のノードを避難開始地点としてリアルタイム避難誘導シミュレーションを実施し、避難経路の視覚的特徴と動的誘導経路による火災遭遇リスクの低減効果を検証した。格子状市街地の検証では得られなかった結果のうち主要な検証結果について、以下に箇条書きで示す。

- P最大経路では、避難圏域を俯瞰して火災リスクが高い地域を避ける経路が得られた。
- 最大余裕経路では、覚知火災に対して十分に迂回する経路が選択される一方、
- ×非常に大回りの経路になるデメリットが確認された。
- M*-P 最大経路では、P 最大経路と最大余裕経路を折衷した特徴が得られた。
- 火災遭遇リスクの低減効果は誘導経路規範によって異なり、P 最大経路は最短経路や最大余裕経路と比較して効果が大きいことが確認された。
- ×M*-P 最大経路や最大余裕経路において大きな避難余裕性を確保する場合、動的更新によって、かえって火災遭遇リスクが増大することが確認された。

第 5 章 最遅避難時刻の不確実性を考慮した避難開始時期決定モデルによる見逃しリスクに対する頑健化

本章では、最遅避難時刻の見逃しを防ぐための避難開始時刻決定モデルを構築した。はじめに、地震火災時において、初期消火活動等の時間確保が必要であることと、最遅避難時刻を避難限界の見切りとすることの意義を指摘した。一方で、最遅避難時刻を見切りとする場合の問題点について、①不完全情報下において最遅避難時刻における避難は経路選択の制約上困難であること、②そもそもリアルタイムにおいて最遅避難時刻の特定が困難であることを挙げ、最遅避難時刻に対する避難開始時刻の比(「最遅避難時刻比」)によって避難開始時期を評価し、避難者の安全を確保しつつなるべく遅い避難開始時刻を決定する方法を検討した。

はじめに、避難開始のタイミングとして、火災の接近による切迫避難、事前リスク評価に基づく事前計画避難、覚知火災情報に基づいて逐次的に勧告判断を行う勧告避難の3つを想定し、適切なタイミングの事前計画避難と勧告避難を設定する方法を検討した。

次に、避難者の自由意思に任せて火災遭遇後の避難を継続する自由避難モデルを導入し、避難場所への到達可能性(「避難成功率」)によって避難リスクを評価するように拡張した。この避難成功率がある許容リスクを満たすように、避難開始時刻を決定する方針を立てた。

まず、①の問題に対して避難開始時刻の目標値を設定した。最遅避難時刻を把握できる前提に立ち、モンテカルロ法によるリアルタイム避難誘導シミュレーションの事前評価に基づく、許容リスクが満たされる最遅避難時刻比の最小値(「安全避難比」)を定義した。この安全避難比に対応する時刻(「安全避難開始時刻」)を目標時刻として設定し、許容リスクという一種の安全水準を満たすことで①の問題に対する回答とした。

次に、②の問題に対して、地震発生後の経過時刻が安全避難開始時刻よりも早いかな否かを最遅避難閾確率と呼ぶ閾値によって判定する方法を検討した。判定方法として、最遅避難時刻の確率分布に関する事前評価(モンテカルロ法によるシミュレーション実験)に基づき最遅避難閾確率と頻度が等しくなる時刻を避難開始時刻とする事前計画避難、そして、覚知火災情報に基づき、連結信頼性と呼ばれるネットワークの途絶可能性の評価手法を用いて、「次回の判断時刻/安全避難比」が最遅避難時刻である確率を逐次評価する勧告避難の2種類の方法をモデル化した。

その後、許容リスクに対する安全避難比を所与として、あらゆる最遅避難閾確率の組み合わせ $\{\alpha, \beta\}$ (事前計画避難: β , 勧告避難: α)に対する避難成功率の事前評価に基づき、避難成功率が許容リスクを満たす組み合わせより、最も避難開始時刻が遅くなる組み合わせを採用することで、当初の目的である避難開始時刻の遅延化を行う手法を構築した。

なお、上記の事前評価の過程において、出火パターンと避難者の位置関係に着目し、火災に押し出されるように避難を開始する下側避難と火災を横切る避難を開始する上側避難に出火パターンを分別し、上側避難の危険性を指摘した上で、上側避難のサンプルに焦点を合わせることを提案した。

第6章 避難開始時期決定モデルによる見逃しリスク低減効果の検証

本章では、格子状市街地を対象として、避難開始時刻決定モデルによる見逃しリスク低減効果の検証及び遅延化された避難開始時刻の評価を行った。はじめに、第3章で構築したリアルタイム避難誘導シミュレーションについて、自由避難及び火災状況に合わせた避難開始時刻の変更を行うように拡張した。その後、格子状市街地を対象として、リアルタイム避難誘導シミュレーションを実施し、避難開始時期決定モデルの効果検証を行った。

第一に、事前評価として最遅避難時刻の確率分布、最遅避難時刻比に対する避難成功率の推移の特徴を分析した。第二に、本分析結果に基づき、「許容リスク=0.01, 0.05」に対して安全避難比を設定し、事前計画避難と勧告避難によって決定される避難開始時刻の特徴を把握するために最遅避難時刻比の分布を評価した。最後に、最遅避難閾確率 $\{\alpha, \beta\}$ に対する避難開始時刻の中央値及び避難成功率を二次平面上にマッピングすることで可視化し、許容リスクを満たす組み合わせの分布の特徴及び遅延化された避難開始時刻について分析した。以下に、主だった結果を箇条書きで示す。

- ・火災の接近に押し出されて避難を開始する下側避難は、そうではない上側避難と比較して、最遅避難時刻は早く、安全避難比は大きいことが確認された。したがって、上側避難を見込んで安全避難比を設定することが、安全上重要であることが示唆された。
 - ・上下避難・延焼速度・歩行速度・覚知確率が強く安全避難比に影響しており、安全避難比を規定する大きな要因として火災遭遇後の迂回しやすさの存在が示唆されたことを明らかにした。
 - ・固定時刻が設定される事前計画避難は、最遅避難閾確率の増減に対して、最遅避難時刻比は左右に推移し、広い範囲に分布することが確認された。
 - ・事前計画避難は、最遅避難時刻の確率分布を直接利用するため、最遅避難閾確率に近い安全超過率を得ることが確認された。
- 覚知火災情報に基づいた最遅避難確率に従って逐次的に時刻決定する勧告避難では、覚知火災による切迫性に追従することで、安全避難比付近に最遅避難時刻比のピークが存在し、比較的狭く分布することが確認された。
- ×勧告避難は、覚知火災情報を規定する覚知確率によって性能が左右され、覚知確率が低い場合には事前計画避難と似た分布が得られることが確認された。
- △覚知確率が高い場合、勧告避難の性能は向上するものの(ばらつきが小さくなる)、連結信頼性を評価するためのミニマルパスセットの構築が困難になる、避難可能確率による信頼性評価の精度の問題といった技術的課題が確認された。
- ×安全避難比が 1.0 に近い場合、最遅避難時刻比のばらつきを伴う事前計画避難・勧告避難では、最遅避難時刻を見逃す問題が確認された。これは、実際の最遅避難時刻に対して確定的に最遅避難時刻比を設定して事前評価を行って求めた安全避難比では生じないリスクであり、不完全情報下における本モデルの限界が示唆された。
- 事前計画避難・勧告避難を組み合わせることで、安全避難開始時刻と同程度の時刻まで許容リスクを満たす避難開始時刻を遅延化できることが確認された。
- 避難開始時刻を遅延化させる鍵として、勧告避難が十分機能し、固定的な事前計画避難を補助するように避難開始時刻が決定されることの重要性が示唆された。

第7章 大井競馬場・しながわ区民公園一帯を対象とした避難開始時期決定モデルのケーススタディ

本章では、大井競馬場・しながわ区民公園一帯の避難圏域を対象として、火災リスク・道路ネットワークが不均質な実市街地による避難開始時期決定モデルのケーススタディを行った。本章では、第4章において火災遭遇リスクが高かった中延四丁目の重心付近のノードを避難開始地点として、避難開始時期決定モデルによるリアルタイム避難誘導シミュレーション実験を行った。基本的な特徴はすでに第6章で得られたものと同様な結果が得られた。本章特有の結果として、誘導経路規範の違いによるものを以下に箇条書きで示す。

- 安全避難比について、火災リスクが不均質な実市街地では自由避難と動的誘導経路に大きな差が確認された。特に、覚知確率が1.0の場合、動的更新を用いることで安全避難比を1.0付近まで向上させることが確認された。
- △火災リスクや道路ネットワークの粗密が不均質な実市街地では、避難可能確率による信頼性の評価・ミニマルパスセット探索の偏りによって、探索時刻や覚知確率の条件によっては、正確な評価・覚知状況に対して変動しないと推察されるミニマルパスによって、最遅避難閾確率に対する感度が落ちることが確認された。
- 避難開始時期決定モデルを適用しない切迫避難では、避難開始時刻の中央値が最遅避難時刻の中央値よりも遅くに存在し、動的誘導経路を適用しても0.4程度と非常に高いリスクを有していることが確認され、動的誘導経路の限界が示されたと共に、避難開始時期決定モデルの適用による火災の接近を待たない避難の重要性が示唆された。
- 避難開始時期決定モデルと動的誘導経路を組み合わせることで、4時間後の最遅避難時刻に対して、3.6時間程度まで遅延化させることが可能であることが確認され、本研究のリアルタイム避難誘導モデルの優位性が示された。

8.2 リアルタイム避難誘導体制の実現に向けた提言

本研究では、次節で述べるように幾つもの課題を残しているものの、不完全情報下のリアルタイム避難誘導の実現のために示唆された重要な知見がいくつか得られた。本節では、これらの知見に基づき地震火災時のリアルタイム避難誘導の在り方に関する提言を示す。

覚知火災情報を活用したリアルタイム避難誘導体制

地震火災時には、発災後には避難を開始せずに、自宅の近くで様子を見る者、避難準備や混雑防止のために避難の遅れを余儀なくされる者、すぐには避難誘導に従わない者等、早期の避難が叶わない人々も多いと予想される。実際、[廣井ら 2019]による糸魚川大規模火災(平常時火災)の住民の避難行動を調査した結果では、避難勧告や避難による情報を聞いた後、直ちに避難所・避難場所に避難した住民は 26.5%に留まっており、半分以上の住民が避難に関連する行動をとっていない、39.7%が「火の様子を見ていた」としている。酒田大火・関東大震災を対象とした[熊谷, 岸 1983]の調査でも、多くの住民は、火災が接近しなければ避難を開始していない。

地震火災時の同時多発的な状況下において、火災が接近し切迫した状態での避難では、高い確率で避難不能に陥ることが、第 6 章・第 7 章にて確認された。一方、本研究のリアルタイム避難誘導モデルによって、火災遭遇リスクを低減するとともに避難開始時刻の遅延化を図ることができることが確認され、地震発生後、暫く経過した後でも避難誘導を実行できる体制づくりが可能であることが示唆された。したがって、地震火災時には本研究のリアルタイム避難誘導モデルを基礎として、上記のすぐには避難を開始しない住民の避難体制を整備すべきである。

一方で、その性能の規定要因として覚知確率が大きく影響している。覚知確率が低いほど、火災遭遇リスクの低減効果が小さくなり、特に、動的更新による効果は小さくなることが確認された。逆に、覚知確率が 1.0(すべての火災が初動対応期に覚知される)であれば、火災遭遇リスクはゼロに、避難開始時刻は最遅避難時刻間際まで近づけ、覚知確率の向上が猶予時間の確保にもつながることが示唆された。本論では、この覚知確率の意味について深くは触れなかったが、この覚知確率は、住民一人一人の情報提供能力とも捉えることができる。すなわち、行政と住民の覚知火災情報の共有体制を整えることが本避難誘導を重要である。

しかしながら、覚知確率を可能な限り高めても、本モデルを最大限に機能させることは非常に難しく、自由避難での避難・動的更新を行わない・事前計画避難のみといった一部が欠けた避難誘導では、火災への遭遇リスクや最遅避難時刻の見逃しが残る。また、覚知までのタイムラグ、離散的な情報伝達間隔による断続的な情報伝達により、リスクをゼロにすることは不可能であり、圏域別に数万単位の避難者が存在すると考えると被害者をゼロとすることは困難である。加えて、本研究の効果は、「許容リスク」分のリスクを負った前提での火災遭遇リスクの低減・遅延化であることも注意する必要がある。

以上の不完全情報下の不確実性による限界の存在を理解し、今後の地震火災対策・避難誘導対策を検討すべきである。

リスクを負う人の命綱としてのリアルタイム避難誘導體制

本研究のリアルタイム避難誘導に関わらず、地震発生時には、多くの人々が災害対応に従事される。住民による初期消火活動や救助活動、消防団による地域での応急対応は地域防災の要である。一方で、こうした使命感のある人々の災害対応は、時として、リスクを顧みない無理のある活動に発展している。[総務省消防庁]の報告によると、では、消防団員の死者・行方不明者は254名にも上っており、その多くは、地震発生後の沿岸部における消防団活動中の殉職である。災害時にはこのようなリスクを負う活動によって救われる命や軽減される被害も多く、災害対応への従事者を守る対策が非常に重要である。

地震火災時においても、消防団や地域の防災組織による避難の見切りを付けない消火活動や救助活動、要支援者等の避難支援・誘導によって、避難が遅れる逃げ惑いに陥る可能性は容易に想像ができる。本研究のリアルタイム避難誘導モデルは、許容リスクという指標の下、避難開始時刻を決定している。この許容リスクは、上記のような命がけの活動における見切り線と捉えることができる。この見切り線を付けた状態で活動することで、リスクを負う人々の命がけの活動を尊重しつつ、許容リスク内での安全が担保されると考えられる。以上のように、本研究のリアルタイム避難誘導モデルによる体制を、リスクを負う人々の命綱として確保することを提案する。

不完全情報下の不確実性と許容リスクに対する理解と合意形成

本研究では、不完全情報の不確実性に対して、許容リスクという恣意的に与えるパラメータにより避難開始時刻を決定している。許容リスクは、許容される避難場所へ到達できない可能性を表しており、すなわち、人の死と避難開始までの猶予時間を天秤にかけており、非常にセンシティブな値である。本論でも述べている通り、覚知確率が低い体制では、不完全情報下の不確実性は非常に大きく避難に影響を与えており、火災への遭遇や逃げ遅れに繋がる。したがって、この許容リスクは本モデルにおいて外せない指標であり、一定程度の許容リスクを認めない限り、本避難誘導の猶予時間の確保に繋がらない。許容リスクを提示することは避難誘導の対象者の命を押し量っていることになるため、この許容リスクへの理解を深めなければ、対象者の避難誘導に繋がらない(避難誘導に従ってくれない)だけではなく、体制づくり自体が滞ってしまうと考えられる。

今後、本避難誘導モデルに基づく体制を推し進めるためには、この許容リスクの適切な定め方を検討することは当然のこと、誘導の対象となる避難者とのリスクコミュニケーションを図り、許容リスクに対する理解と合意形成を図る必要がある。

8.3 今後の課題

本研究は、非常に強い仮定の下、避難リスク及びリアルタイム避難誘導のモデル化を行った。その中には、数理モデルとしての不良・再検討すべき問題が多くあり、それらを見逃した点は否定できない。また、各種パラメータや関数に依存したモデルであること、各事象の簡便なモデル化(建物倒壊や混雑の見逃し、完全にランダムな出火点分布・等速同心円状の延焼動態)という現実な複雑な事象を捨象した仮定は、地震火災時の避難誘導の基本的な特性を把握できるといった意義がある一方、現実の運用に適用するには重大な課題がある。また、これらの課題を解決したとしても、火災情報の収集から伝達・受容までの体制づくり、不完全情報の避難リスクによる誤誘導(危険な経路を提示、避難開始時期の見逃し)に対する合意形成の問題等、実際の運用上の課題が数多く残される。加えて、地震火災時のリスクを低減させる方策は、避難場所の動的な変更や一時集合場所の段階的な移動を考慮した、より柔軟な避難誘導、住民の初期消火や公的消防による火災防御による被害軽減との相乗効果等、本研究で検討した避難経路・避難開始時刻の決定以外にもあり、これらを組み合わせた総合的な対策検討が重要である。

こうした対策を検討した際、検討すべきリスクが新たに想起され、評価・低減方策を検討する必要が生じると考えられる。現代都市において依然経験していない逃げ惑いが生じるような地震火災に対して、万全な対策を打ち立てることは非常に困難ではあるが、こうしたリスクの想起・評価・対策検討の一連の流れを繰り返していくことで、将来発生しうる首都直下地震において被害を最小限に食い止められると信じている。以上の課題について全てを網羅することは難しいが、本研究を今後も継続していくための参考としても、思いつく限りの課題を挙げて本論を終えたいとする。

モデルの改善すべき点・限界

- ・最遅避難時刻比の改善：より詳細な避難メカニズムを考慮した火災リスクに対する切迫性による避難開始時刻の評価 (火災の延焼フェーズの考慮)
- ・下側避難，上側避難の細分化：避難リスクによる，より詳細な出火パターンの分類
- ・安全避難比が 1.0 に近い状態における避難開始時刻の決定方法
- ・勧告避難の最遅避難確率推定における連結信頼性の評価方法の高精度化

追加で必要な分析・検証

- ・本研究のモデルを活用した地震火災時の避難誘導リスクの詳細な分析
- ・異なる対象地，避難開始後の経時的な特性分析
- ・逃げ惑いの構造的な解析
- ・市街地特性と避難誘導特性(安全避難開始時刻等)の関係
- ・避難誘導効果を得るのに必要な覚知確率に関する分析
- ・避難開始時刻のばらつきに関する分析
- ・各パラメータと事前計画避難・勧告避難のバランスの関係

本モデルの応用

- ・ 許容リスクの客観的指標の検討
- ・ 建物倒壊を考慮した避難誘導モデルへの拡張
- ・ 延焼拡大予測モデルを考慮した避難誘導モデルへの拡張
- ・ 消火活動による減災効果を考慮した避難誘導モデルへの拡張
- ・ 避難場所の逐次変更を組み合わせた避難誘導體制への拡張
- ・ 一時的に安全な場所を段階的に移動する避難モデルへの応用
- ・ 避難誘導情報の伝達方法の検討と避難経路情報の変換(経路から言語, 経路から避難方向)による避難リスクの変化の検証

参考文献

- [阿部 2005] 阿部英樹:空間構成を考慮した市街地難燃化整備計画に関する基礎的研究, 筑波大学博士論文, 2005.
- [岡本 2018] 岡本弘暉:地震火災時における住民による初期消火活動の限界時間の検討, 筑波大学修士論文, 2018.
- [加藤 1998] 加藤孝明:延焼危険からみた市街地の防災性能の評価理論に関する基礎的研究, 東京大学博士論文, 1998.
- [加藤 2016] 加藤孝明:大都市の地震火災の危険性とその対策課題, 日本地震工学会, 日本地震工学会論文集, 第 16 巻, 第 5 号, 2016.
- [加藤ら 2006] 加藤孝明, 程洪, 亜力坤玉素甫, 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, 一般社団法人地域安全学会, 地域安全学会論文集, No.8, pp.1-10, 2006.
- [梶ら 1982] 梶 秀樹, 熊谷 良雄, 増山 格, 野堀 勝明:広域避難計画における地区別避難危険度の算定, 昭和 57 年度第 17 回日本都市計画学会学術研究発表会論文集, pp.559-564, 1982.
- [岩見ら 2006] 岩見達也, 倉淵隆, 林吉彦, 西沢繁毅:密集市街地における風の流れを考慮した火災性状把握, 日本都市計画学会, 都市計画論文集, No.41-3, pp.851-856, 2006.
- [久松, 伯野 1972] 久松喜彦, 伯野元彦:地震火災時避難に関する一考察, 地震工学研究発表会講演概要, 12 巻, pp.95-98, 1972.
- [宮下ら 2020] 宮下 大祐, 糸井川 栄一, 鈴木 雄太:地震火災における消防隊の消火活動を考慮した住民避難時の人的被害低減に関する基礎的研究, 地域安全学会論文集, No.37, pp.31-39, 2020.
- [金井, 梶 2002] 金井 淳子, 梶 秀樹:大震時の火災時による道路閉塞を考慮したリアルタイム避難誘導のための避難開始時刻決定に関する研究, 地域安全学会論文集, No.4, pp.25-30, 2002.
- [熊谷ら 1982] 熊谷良雄, 青木善次, 糸井川栄一, 辻:建物用途を考慮した地区別出火危険度の算定方式に関する研究, 第 17 回日本都市計画学会学術研究発表会論文集, pp553-558, 1982.
- [熊谷, 岸 1983] 熊谷良雄, 岸栄吉:火災時における避難行動の分析 酒田大火と関東地震火災・東京を例にして, 日本都市計画学会, 都市計画論文集, 18 巻, pp.169-174, 1983.
- [栗田 2007] 栗田治:出火の地点と時刻がランダムな多発火災の延焼モデル-空間ポアソン分布に基づく確率論的アプローチ-, 都市計画論文集, No.42-3, pp.499-504, 2007.
- [建設省 1982] 建設省:建設省総合技術開発プロジェクト 都市防火対策手法の開発 報告書, 1982.
- [建築研究所 1989] 糸井川栄一, 石見利勝, 梶秀樹, 河中俊, 熊谷良雄, 塚越功, 増山格:地震火災時のリアルタイム情報処理システムの開発—延焼拡大予測と避難情報処理に関する研究—, 建設省建築研究所, 建築研究報告, No120, 1989.
- [国土交通省 2012] 国土交通省:「地震時等に著しく危険な密集市街地」について, 報道・広報, http://www.mlit.go.jp/report/press/house06_hh_000102.html, 2012.
- [腰塚, 小林 1983] 腰塚武志, 小林純一, “道路距離と直線距離”, 日本都市計画学会, 日本都市計画学会学術研究発表会論文集, No.18, pp.43-48, 1983.
- [佐々木, 関澤 2014] 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, 64 巻, 3 号, pp.29-37, 2014.

- [清水, 糸井川 2019] 清水純平, 糸井川栄一: 地震火災時の不完全情報下における不確実な避難誘導情報の活用意図に関する研究, 地域安全学会論文集, No.35, pp.163-171, 2019.
- [三好ら 2008] 三好 孝典, 松下義男, 橋本濟, 糸井川栄一, 村尾修: 出火・延焼リスクを考慮した広域避難計画に関する研究, 地域安全学会, No.10, pp.105-112, 2008.
- [糸井川 1990] 糸井川栄一: 市街地における出火・延焼危険評価手法に関する基礎的研究, 東京工業大学学位論文, 1990.
- [糸井川, 塚越 1988] 糸井川栄一, 塚越功: 飛火を考慮した市街地火災の確率的延焼モデル, 日本都市計画学会学術研究論文集, 第 23 号, pp.469-474, 1988.
- [糸井川ら 1991] 糸井川栄一, 塚越功, 青木義次: 防火地域性と市街地の防火目標に関する一考察, 日本都市計画学会学術研究論文集, No. 26, pp.211-216, 1991.
- [若林 1989] 若林拓史: 道路網の信頼性解析に関する基礎的研究, 学位論文, 1989.
- [渋谷, 糸井川 2016] 渋谷孝行, 糸井川栄一: 延焼クラスタを考慮した地震火災時における避難危険性評価に関する研究, 一般社団法人地域安全学会, 地域安全学会論文集, No.29, pp.95-105, 2016.
- [小坂, 堀口 1986] 小坂俊吉, 堀口孝男: 広域避難シミュレーション手法による大震火災時の群衆行動解析, 土木学会論文集, 第 365 号, IV-4, pp.51-59, 1986.
- [小出 1982] 小出治: ランダム分布による大震時火災被害予測の検討, 第 17 回日本都市計画学会学術研究発表会論文集, pp.571-576, 1982.
- [上田ら 2007] 上田遼, 瀬尾和大, 元木健太郎: 多地域防災力に着目した地震火災時の災害時要援護者救助シミュレーション: 東京都杉並区阿佐ヶ谷高円寺の木造密集市街地を例として, 日本建築学会計画系論文集, 72 巻 622 号, pp.137-144, 2007.
- [新潟県 2016] : 平成 28 年新潟県糸魚川市における大規模火災に関する情報, <http://www.pref.niigata.lg.jp/kikitaisaku/2016itoigawashikasai.html>.
- [水野, 堀内 1976] 水野弘之・堀内三郎: 地震時の出火件数の予測に関する研究, 日本建築学会報告集, 第 250 号, pp.81-90, 1976.
- [西野 2009] 西野智研: 関東大震災における東京市住民避難性状の推定に関する研究-ポテンシャル法に基づく地震火災時の避難シミュレーションモデルの開発-, 日本建築学会計画系論文集, 第 74 巻, 第 636 号, pp.105-114, 2009.
- [青木 1987] 青木義次: 都市火災拡大の一次元離散型確率モデル 都市火災拡大の確率論的分析研究 その 1, 日本建築学会論文集, pp.111-121, 1987.
- [石井, 腰塚 1998] 石井儀光, 腰塚武志: 同時多発火災における直線的避難距離の分布に関する理論的考察, 都市計画論文集, pp.331-336, 1998.
- [総務省消防庁] 消防庁: 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災) について (第 146 報), <http://www.fdma.go.jp/bn/higaihou.html>.
- [増山, 梶 1984] 増山格, 梶秀樹: 大地震時広域避難計画検討のための最遅避難モデルの開発, 日本都市計画学会, 昭和 59 年度日本都市計画学会学術研究論文集, pp.379-384, 1984.
- [増山, 梶 1985] 増山格, 梶秀樹: 最遅避難モデルによる大震火災時の広域避難計画の評価, 日本都市計画学会, 昭和 60 年度日本都市計画学会学術研究論文集, pp.67-72, 1985.
- [太田, 鏡味 1981] 太田裕, 鏡味洋史: 地震時避難場所の配置計画の検討(2)-避難人口・収容能力の変動と自身危険度の考慮-, 地震 第 2 輯, 34 巻, 2 号 pp.161-174, 1981.
- [大原 2015] 大原美保: 自治体による PUSH 型・PULL 型の災害・避難情報伝達に関する実態調査, 日本地震工学会論文集, 15 巻 5 号, pp. 5_2-5_16, 2015.
- [大佛, 沖 2012] 大佛俊泰, 沖拓弥: 密集市街地における大地震時の避難困難率について, 日本建築学会, 日本建築学会計画系論文集, 第 77 巻, 第 681 号, pp.2561-2567, 2012.

- [大佛, 沖 2016] 大佛俊康, 沖拓弥: 住民による救助活動を組み込んだ大地震時における木密地域の広域避難シミュレーション分析, 日本建築学会計画系論文集, 81 巻 724 号, p. pp.1345-1353, 2016.
- [中川ら 1996] 中川真治, 若林拓史, 飯田恭敬: n 番目最短経路探索を用いた簡便な道路網信頼性解析法とその交通管理運用策への適用, 土木計画学研究論文集, No.13, pp.861-868, 1996.
- [東京消防庁 1987] 東京消防庁: 地震時における地域別の総合出火危険予測と対策, 東京消防庁防災部防災課, 1987.
- [東京消防庁 2001] 東京消防庁: 地震火災に関する地域の防災性能評価手法の開発と活用方策, 火災消防審議会答申, 2001.
- [東京消防庁 2015] 東京消防庁: 東京都の市街地状況調査報告書 (第 9 回), 平成 27 年 3 月に基づく地理情報システムデータ.
- [東京消防庁 2017] 東京消防庁: 東京都の地震時における地域別出火危険度調査(第 9 回), <https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/hp-bousaika/shukkakiken/index.html>, 2017.
- [東京消防庁 2019] 東京消防庁: 地震時等における火災情報等の活用方策, 第 23 期火災予防審議会地震対策部会答申書, 2019.4.
- [東京消防庁 2020] 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, <https://www.tfd.metro.tokyo.lg.jp/hp-bousaika/enshoukiken/no10/index.html>, 2020.
- [東京都 2013] 東京都: 首都直下地震等による東京の被害想定, 東京都防災ホームページ, https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/000/401/assumption_h24outline.pdf.
- [東京都 2013] 東京都: 避難所及び避難場所, 東京都防災ホームページ, <https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/bousai/1000026/1000316.html>
- [東京都 2018] 東京都: 地震に関する地域危険度測定調査報告書(第 8 回), 東京都都市整備局, 2018.
- [東京都都市整備局 2016] 東京都都市整備局: 防災都市づくり推進計画, <http://www.toshi-seibi.metro.tokyo.jp/bosai/bosai4.htm>
- [藤井, 糸井川 2005] 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, 地域安全学会論文集, No.7, pp.351-359, 2005.
- [藤田 1976] 藤田隆史: 大震火災時における住民避難の最適化 避難群集の流動シミュレーション, 計測自動制御学会論文集, 12 巻 4 号, pp.424-431, 1976.
- [日本火災学会 1996] 日本火災学会: 1995 年兵庫県南部地震における火災に関する調査報告書, p.398, 1996.
- [馬淵ら 2008] 馬淵ゆみ, 瀬尾和大, 元木健太郎, 上田遼: 木造密集地域における地震時の広域火災に対する避難計画に関する研究, 地域安全学会論文集, No.10, pp.409-415, 2008.
- [飯田ら 1988] 飯田恭敬, 若林拓史, 吉木務: ミニマルパス・カットを用いた道路網信頼度の近似計算法, 交通工学, Vol.23, No.4, pp.3-13, 1988.
- [浜田 1951] 浜田稔: 火災の延焼速度について「火災の研究 I」, 相模書房, 1951.
- [浜田 1967] 浜田稔: 大火災の輻射熱からみた避難地の選定条件に関する研究, 日本火災学会論文集, 17 巻, 1 号, pp.25-29, 1967.
- [浜田 1975] 浜田稔: 建築防火論, 新訂 3 版, 彰国社, 1975.
- [武松ら 2008] 武末祐樹, 鈴木勉, 糸井川栄一: 地震火災リスクを考慮した避難危険性の評価に関する研究, 日本都市計画学会, 都市計画論文集, No.43, pp.25-30, 2008.
- [堀内, 小林 1973] 堀内三郎, 小林正美: 広域避難計画に関する研究, 都学論報(仮), pp.107-102, 1973.

- [木村ら 2010] 木村雄介, 糸井川栄一, 梅本通孝: 地震火災による広域避難時被災リスクから見た市街地の火災安全水準に関する研究, 地域安全学会, 地域安全学会論文集, No.13, pp.119-129, 2010.
- [李, 梶 1992] 李載吉, 梶秀樹: 拡張最遅避難モデルに基づく避難誘導からみた避難計画の評価, 日本都市計画学会, 都市計画, No.77, pp.72-77, 1992.
- [廣井 2014] 廣井悠: 津波火災に関する東日本大震災を対象とした質問紙調査の報告と出火件数予測手法の提案, 地域安全学会論文集, N0.24, pp.111-121, 2014.
- [廣井ら 2019] 廣井悠, 松原龍, 上園智美, 渡辺竜之: 糸魚川大規模火災における住民の避難行動調査, 日本都市計画学会, 都市計画論文集, Vol.54, No.3, pp.1101-1108, 2019.
- [廣川, 大佛 2017] 廣川典昭, 大佛俊康: 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, 日本建築学会論文集, 第 82 巻第 732 号, pp.301-310, 2017.
- [Peter E. Hart, *et al.* 1968] Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, and Bertram Raphael: *A formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths*, IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics, vol.4, No.2, pp.100-107, 1968.

ウェブページにおける最終閲覧日は 2021 年 1 月 6 日

付録 7.3 節における避難開始時刻・避難成功率マップ

7.3 節において、許容リスクを満たす最遅の避難開始時刻を算出するために、事前計画避難及び勧告避難の最遅避難閾確率の組み合わせ $\{\alpha, \beta\}$ に対する避難開始時刻と避難成功率を2次元平面にマッピングした(避難開始時刻・避難成功率マップ)。本論では、避難開始時刻・避難成功率マップより、各許容リスクにおける避難開始時刻を線形補間によって求めている。ここに、覚知確率別・許容リスク別・誘導経路規範別に避難開始時刻・避難成功率マップを添付する。7.3 節における遅延化された避難開始時刻を解釈する参考にされたい。

付録 1. (覚知確率=0.5,許容リスク $p^* = 0.01$)の避難開始時刻-避難成功率マップ

付録 2. (覚知確率=0.5,許容リスク $p^* = 0.05$)の避難開始時刻-避難成功率マップ

付録 3. (覚知確率=0.7,許容リスク $p^* = 0.01$)の避難開始時刻-避難成功率マップ

付録 4. (覚知確率=0.7,許容リスク $p^* = 0.05$)の避難開始時刻-避難成功率マップ

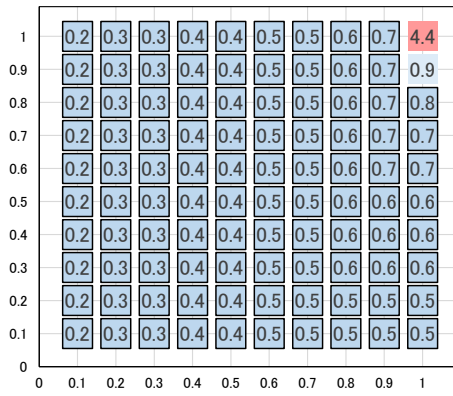
付録 5. (覚知確率=0.9,許容リスク $p^* = 0.01$)の避難開始時刻-避難成功率マップ

付録 6. (覚知確率=0.9,許容リスク $p^* = 0.05$)の避難開始時刻-避難成功率マップ

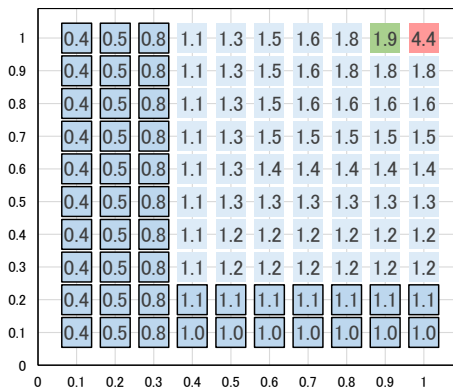
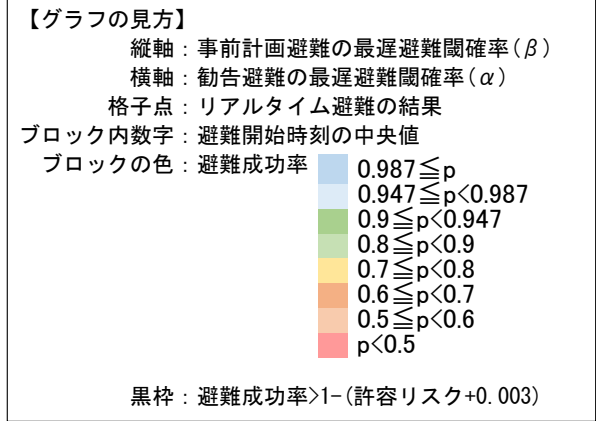
付録 7. (覚知確率=1.0,許容リスク $p^* = 0.01$)の避難開始時刻-避難成功率マップ

付録 8. (覚知確率=1.0,許容リスク $p^* = 0.05$)の避難開始時刻-避難成功率マップ

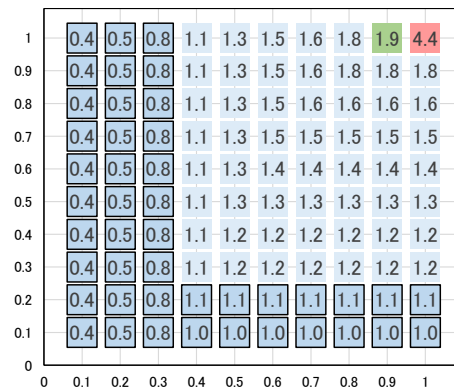
付録 1. (覚知確率=0.5,許容リスク $p^* = 0.01$)の避難開始時刻-避難成功率マップ



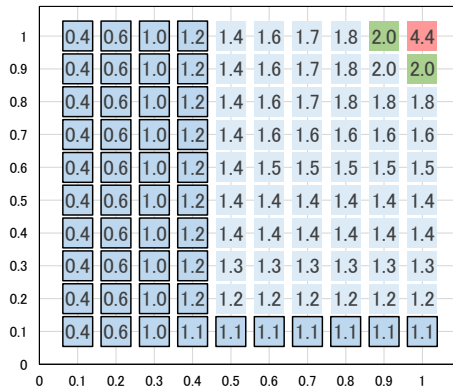
自由避難



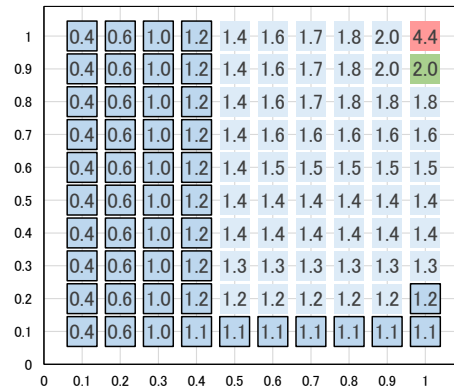
P最大経路



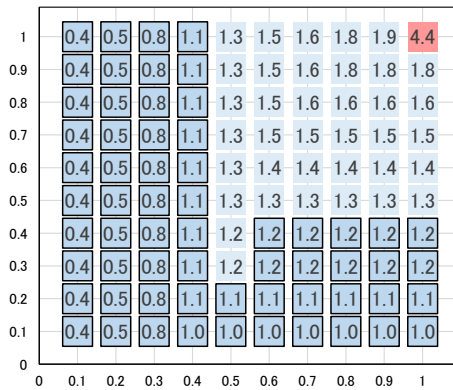
P最大経路+動的更新



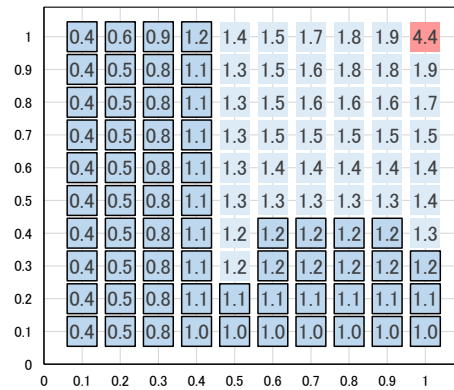
M*(0.5)-P最大経路



M*(0.5)-P最大経路+動的更新

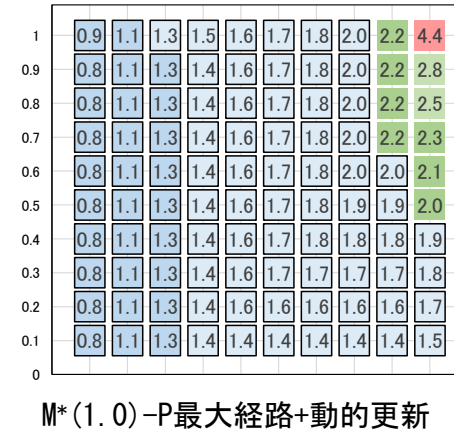
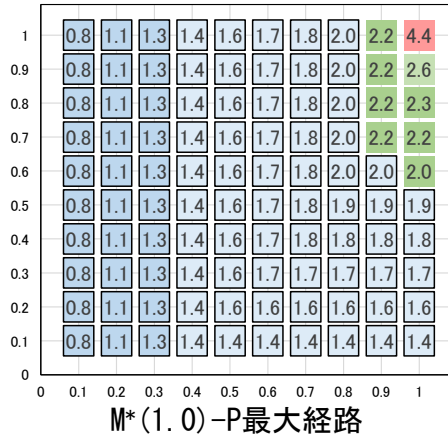
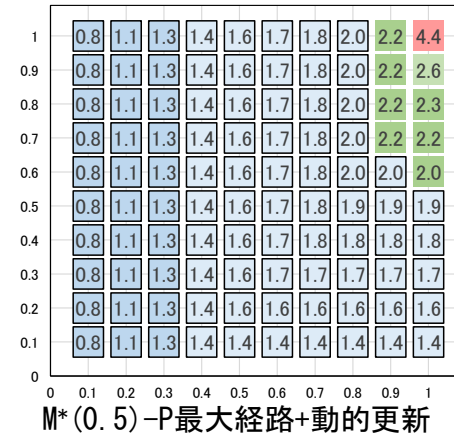
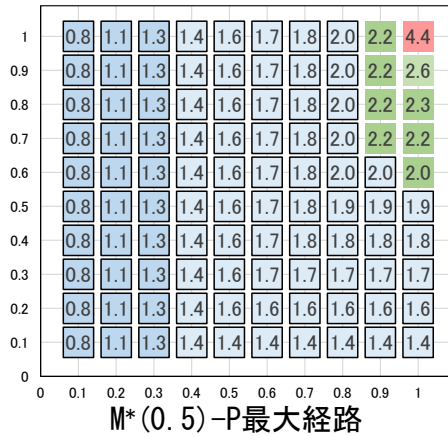
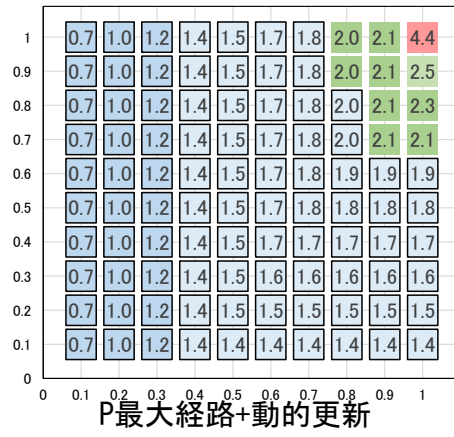
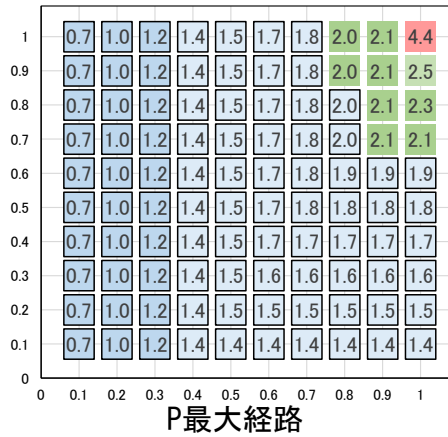
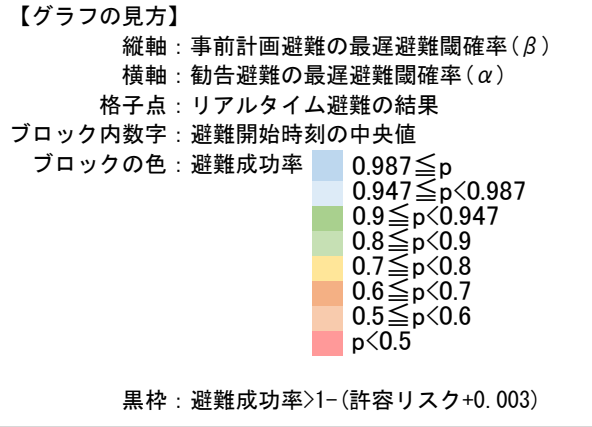
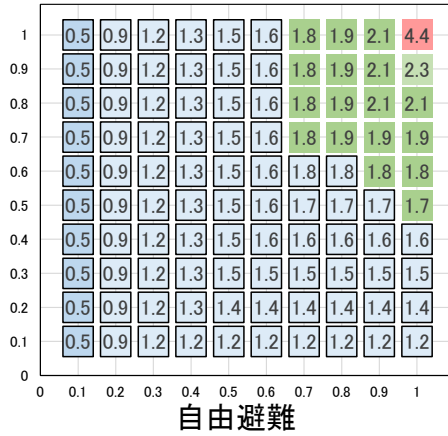


M*(1.0)-P最大経路

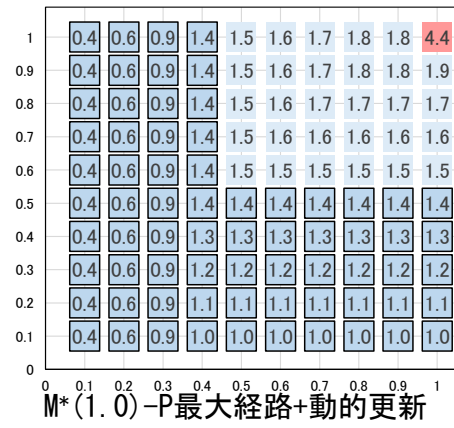
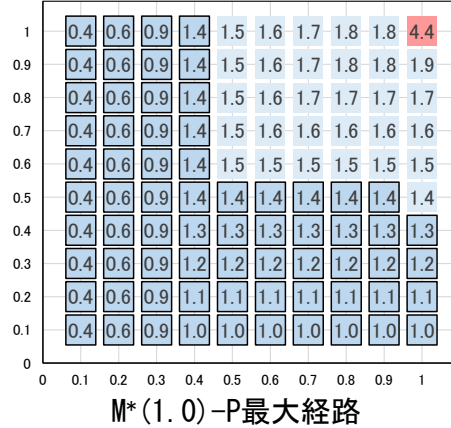
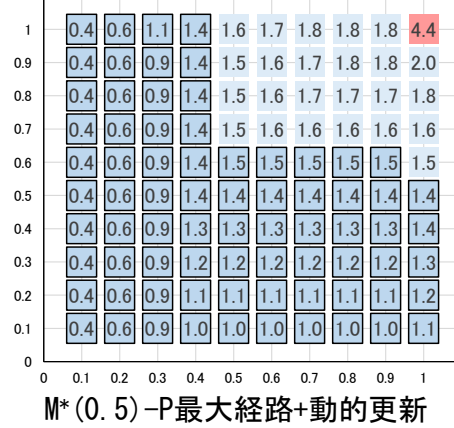
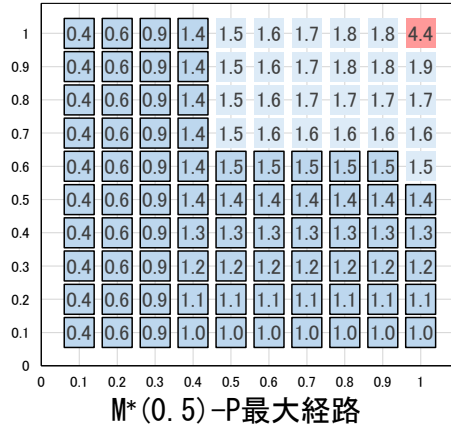
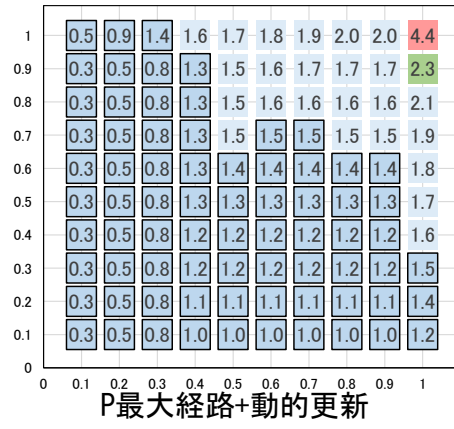
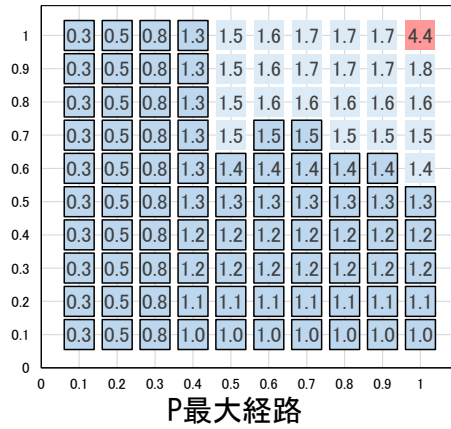
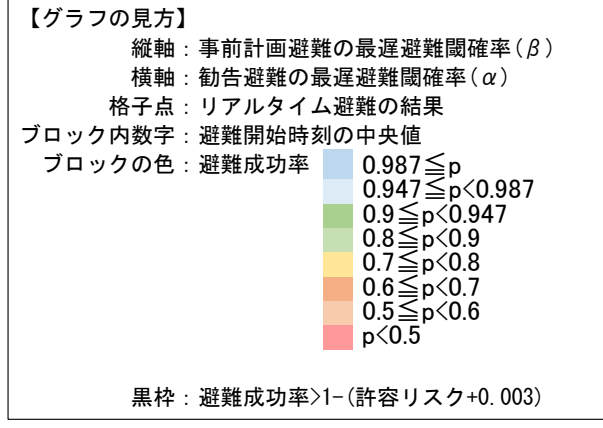
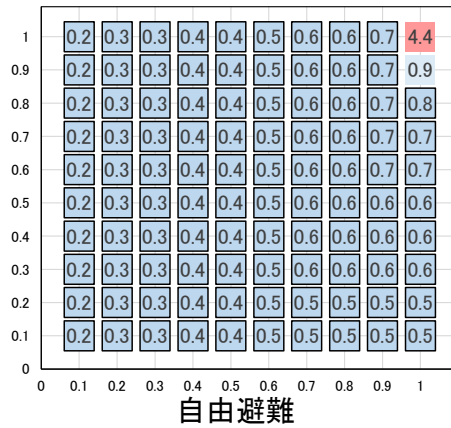


M*(1.0)-P最大経路+動的更新

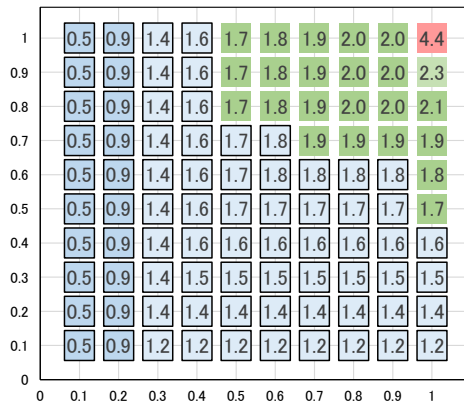
付録 2. (覚知確率=0.5, 許容リスク $p^* = 0.05$) の避難開始時刻-避難成功率マップ



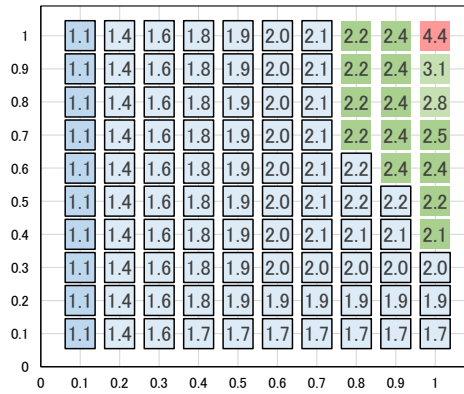
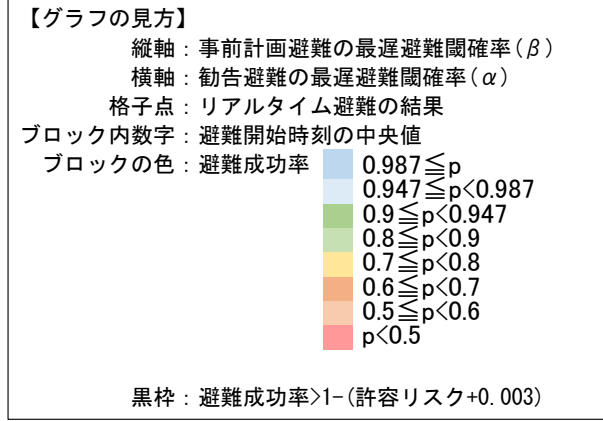
付録 3. (覚知確率=0.7, 許容リスク $p^* = 0.01$) の避難開始時刻-避難成功率マップ



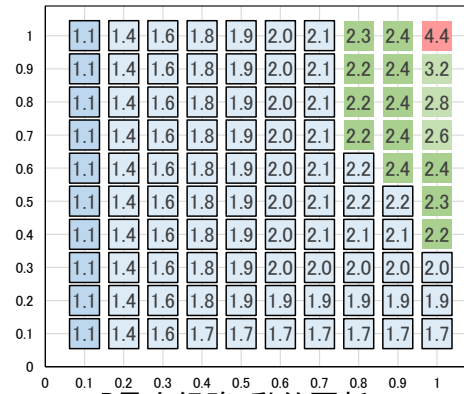
付録 4. (覚知確率=0.7,許容リスク $p^* = 0.05$)の避難開始時刻-避難成功率マップ



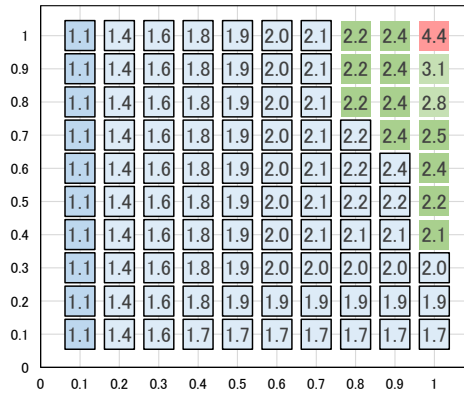
自由避難



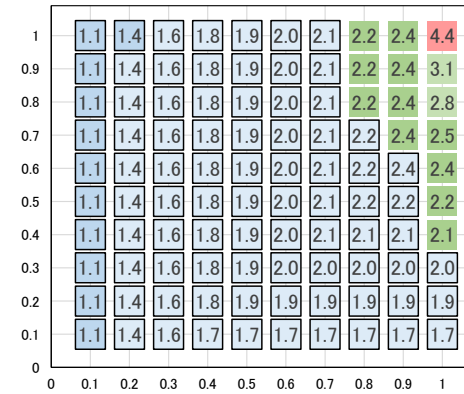
P最大経路



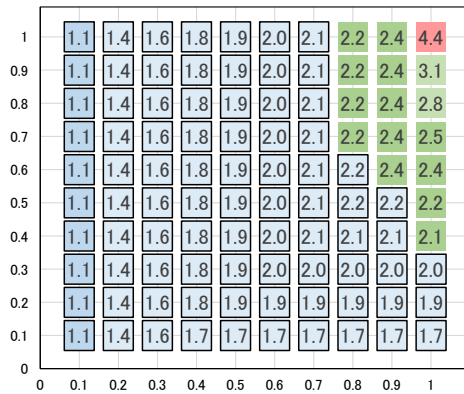
P最大経路+動的更新



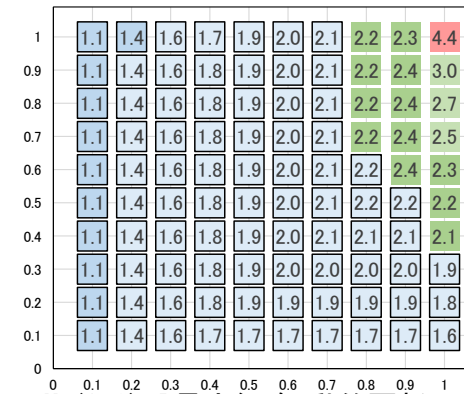
M*(0.5)-P最大経路



M*(0.5)-P最大経路+動的更新

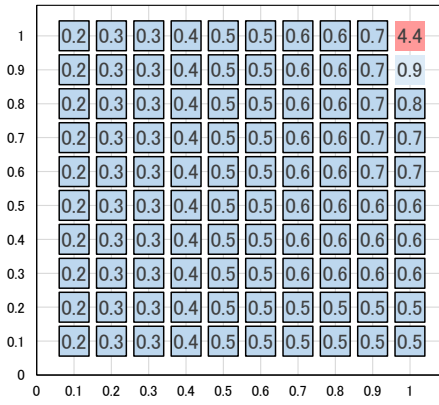


M*(1.0)-P最大経路

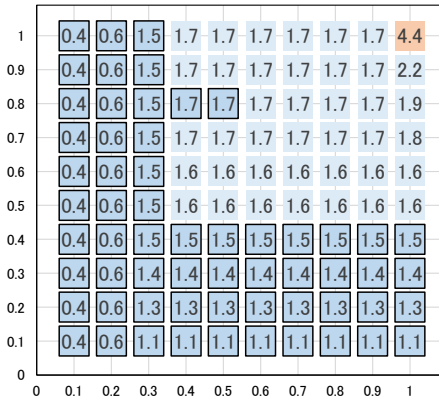
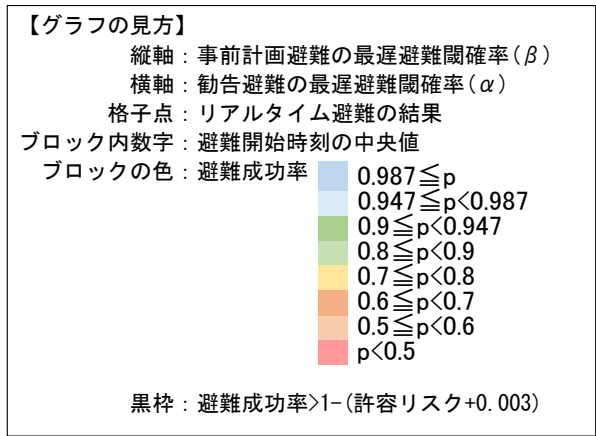


M*(1.0)-P最大経路+動的更新

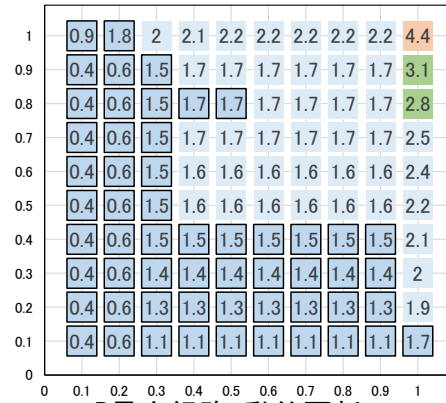
付録 5. (覚知確率=0.9, 許容リスク $p^* = 0.01$) の避難開始時刻-避難成功率マップ



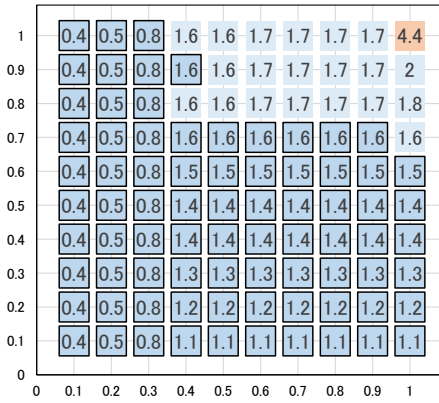
自由避難



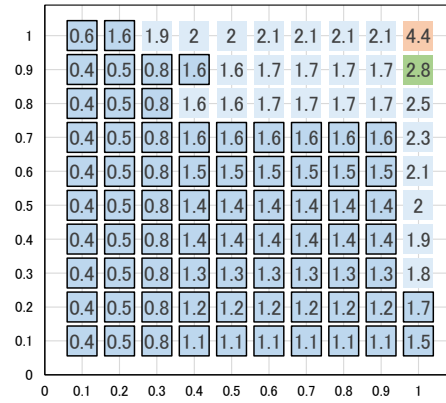
P最大経路



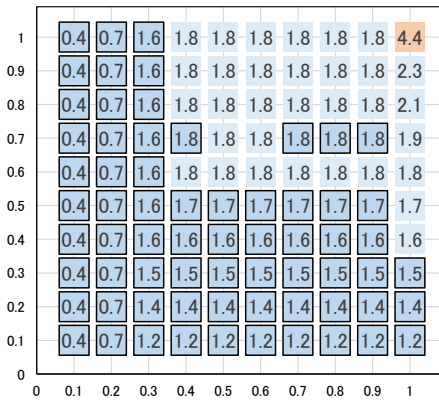
P最大経路+動的更新



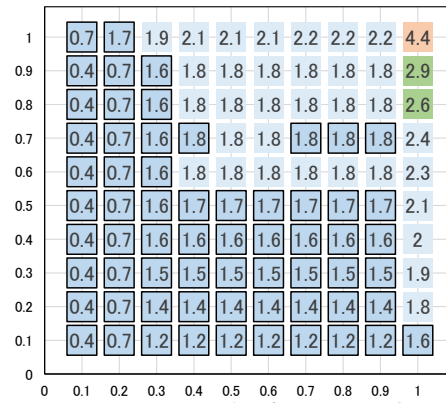
$M^*(0.5)$ -P最大経路



$M^*(0.5)$ -P最大経路+動的更新

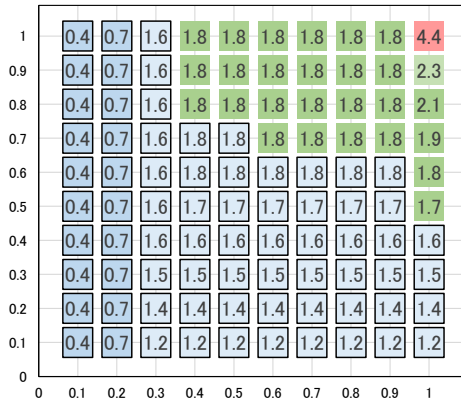


$M^*(1.0)$ -P最大経路

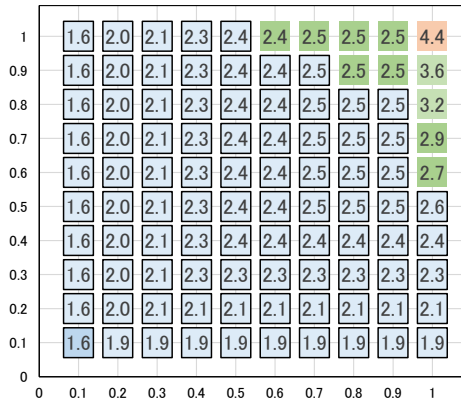
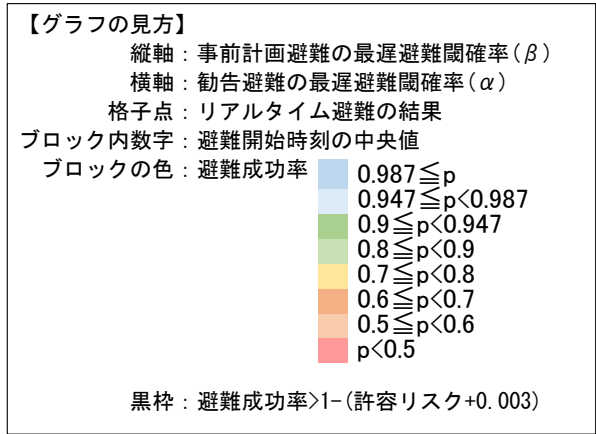


$M^*(1.0)$ -P最大経路+動的更新

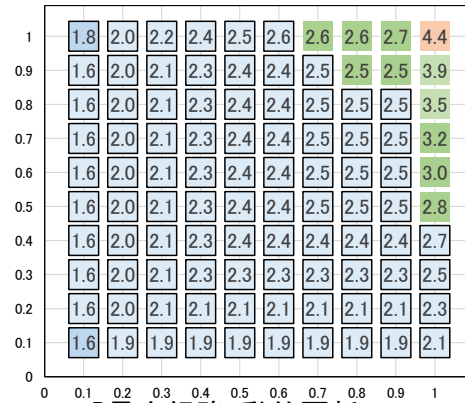
付録 6. (覚知確率=0.9,許容リスク $p^* = 0.05$)の避難開始時刻-避難成功率マップ



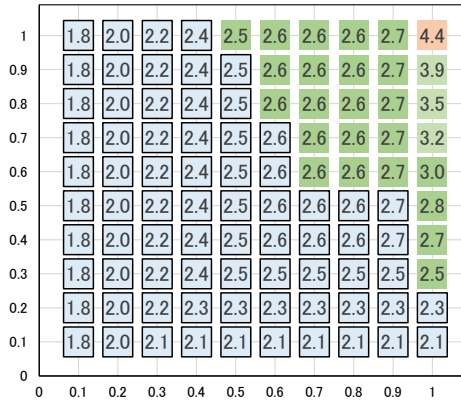
自由避難



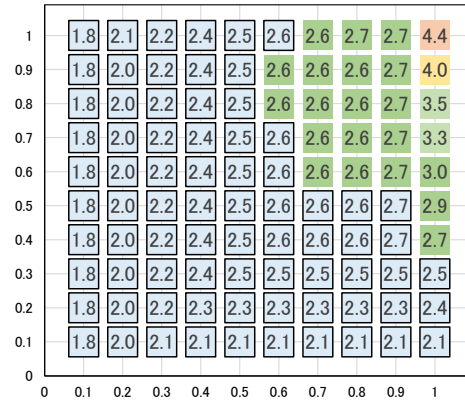
P最大経路



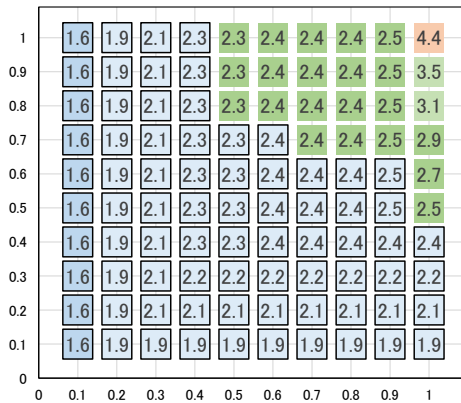
P最大経路+動的更新



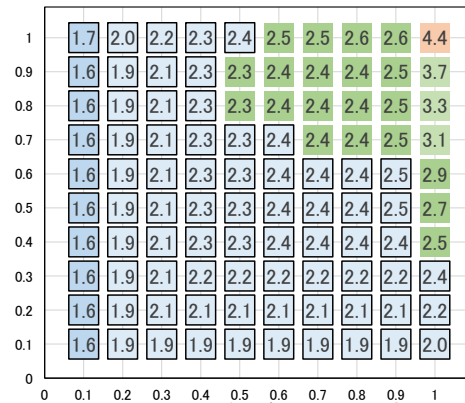
M*(0.5)-P最大経路



M*(0.5)-P最大経路+動的更新

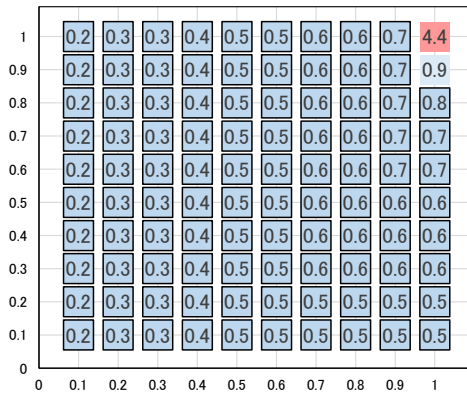


M*(1.0)-P最大経路

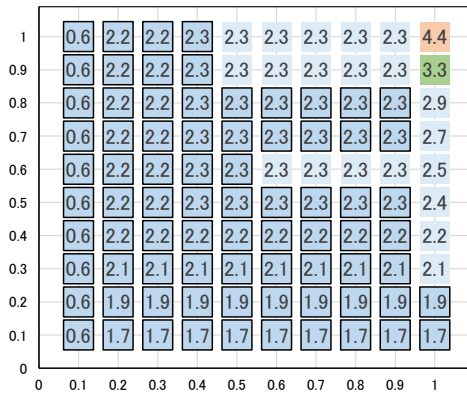
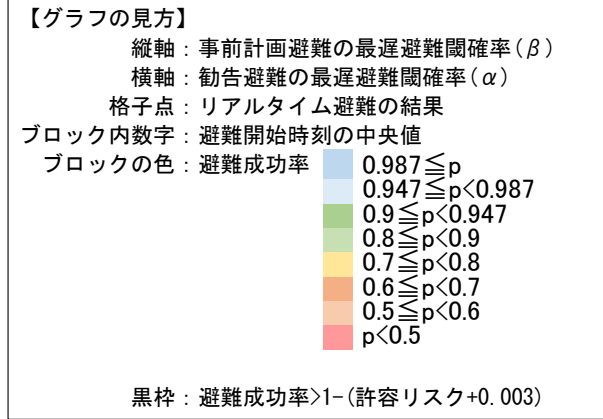


M*(1.0)-P最大経路+動的更新

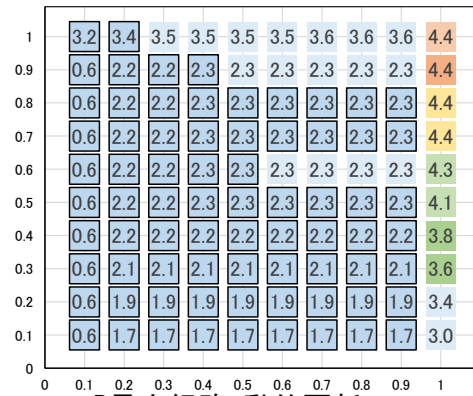
付録 7. (覚知確率=1.0,許容リスク $p^* = 0.01$)の避難開始時刻-避難成功率マップ



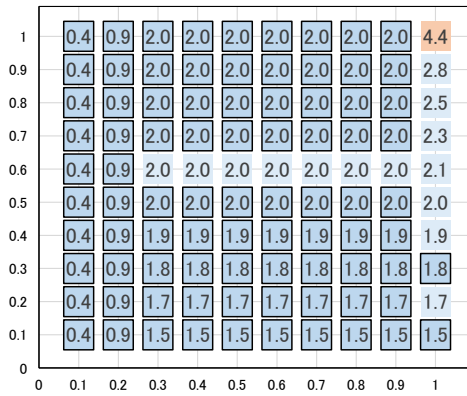
自由避難



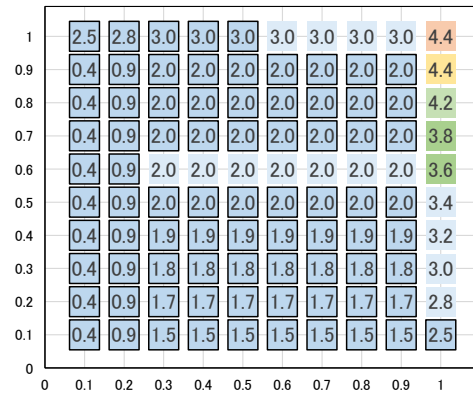
P最大経路



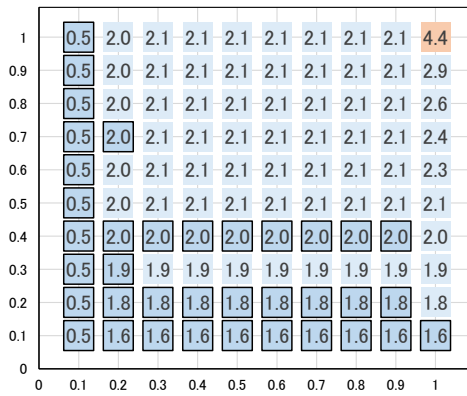
P最大経路+動的更新



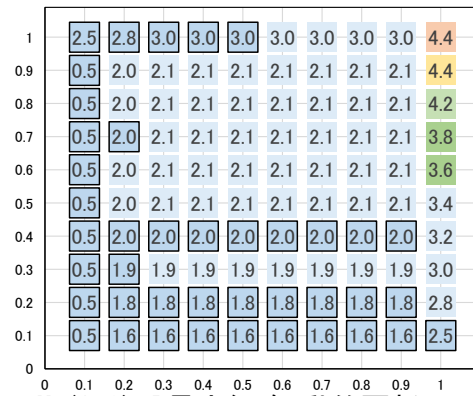
M*(0.5)-P最大経路



M*(0.5)-P最大経路+動的更新

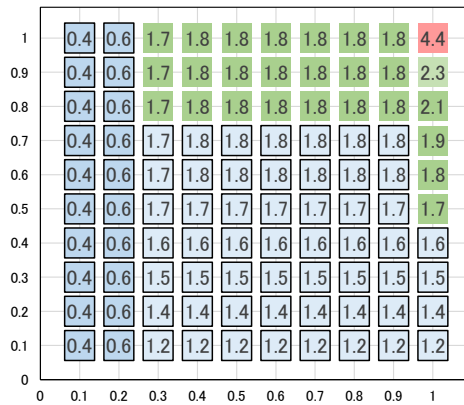


M*(1.0)-P最大経路

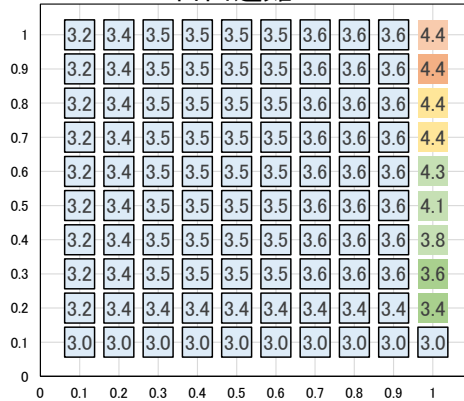


M*(1.0)-P最大経路+動的更新

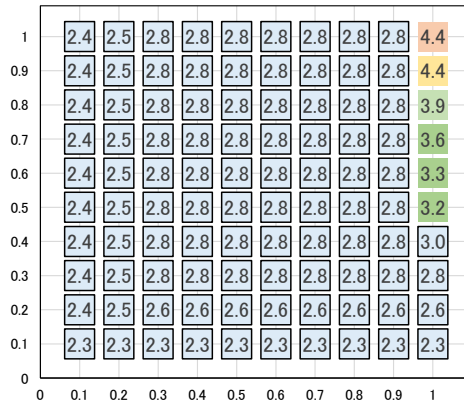
付録 8. (覚知確率=1.0,許容リスク $p^* = 0.05$)の避難開始時刻-避難成功率マップ



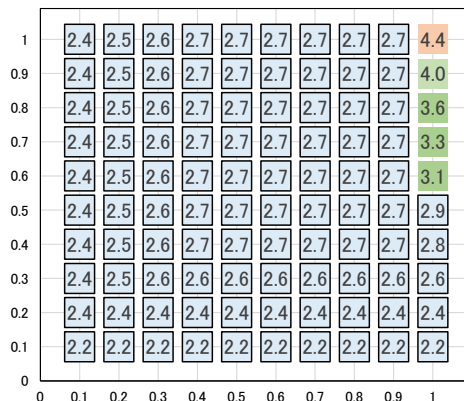
自由避難



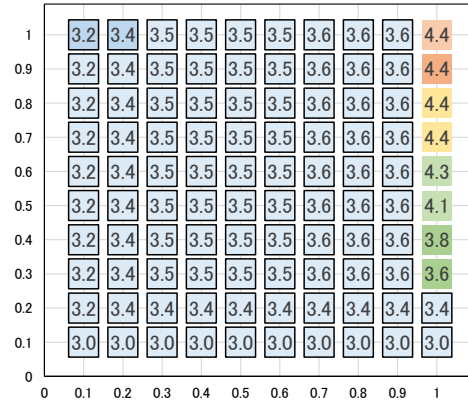
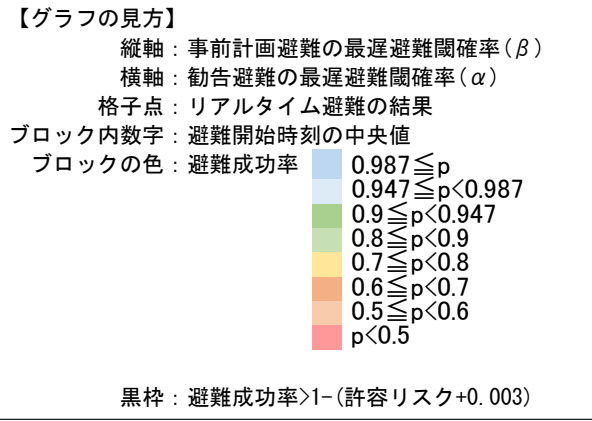
P最大経路



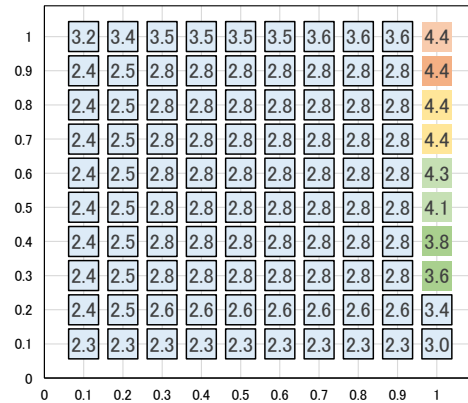
M*(0.5)-P最大経路



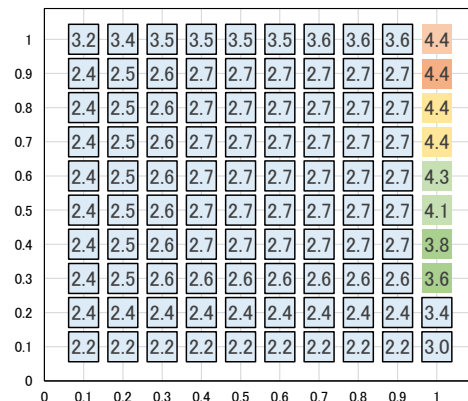
M*(1.0)-P最大経路



P最大経路+動的更新



M*(0.5)-P最大経路+動的更新



M*(1.0)-P最大経路+動的更新

目録

本研究の第2章・第3章・第4章は、以下の投稿論文を基に、再構成・執筆している。
第5章・第6章・第7章は、今後、査読付き論文への投稿を予定している。

査読付き論文

- 1) 鈴木 雄太, 糸井川 栄一 「地震火災における延焼予測のばらつきに対して安全な避難経路の最適化 -不完全情報下におけるリアルタイム避難誘導のための提案-」, 地域安全学会論文集, No.33, pp.175-185, 2018.
- 2) 鈴木 雄太, 糸井川 栄一 「地震火災時のリアルタイム避難誘導における未覚知火災の不確実性を考慮した避難経路の最適化」, 地域安全学会論文集, No.35, pp.153-162, 2019.
- 3) 宮下 大祐, 糸井川 栄一, 鈴木 雄太 「地震火災における消防隊の消火活動を考慮した住民避難時の人的被害低減に関する基礎的研究」, 地域安全学会論文集, No.37, pp.31-39, 2020.

査読の無い発表論文

- 4) 鈴木 雄太, 糸井川 栄一 「地震津波時における消防団員の参集意向-千葉県8市町村の沿岸部消防団を対象として-」, 地域安全学会梗概集, No.39, pp.41-44, 2016.
- 5) 鈴木 雄太, 糸井川 栄一 「大震災火災時における出火時刻分布を考慮した避難リスク評価」, 地域安全学会梗概集, No.40, pp.15-18, 2017.
- 6) 鈴木 雄太, 糸井川 栄一 「地震火災時のリアルタイム避難誘導における危険性に関する考察-覚知火災情報の不完全性に着目して-」, 地域安全学会梗概集, No.42, pp.179-182, 2018.
- 7) 鈴木 雄太, 糸井川 栄一 「地震火災時のリアルタイム避難誘導における住民の安全確保に必要な火災覚知率に関する基礎的研究-未覚知火災を考慮した避難可能確率に着目して-」, 地域安全学会梗概集, No.43, pp.99-102, 2018.
- 8) 鈴木 雄太, 糸井川 栄一 「地震火災時のリアルタイム避難誘導支援を目的とした避難経路可視化システムの開発」, 地域安全学会梗概集, No.44, pp.51-14, 2019.
- 9) 鈴木 雄太, 糸井川 栄一: 地震火災の延焼拡大予測データベースを活用したリアルタイム避難誘導支援システムの開発, 地域安全学会梗概集, No.46, pp.129-132, 2020.
- 10) 鈴木 雄太, 糸井川 栄一: 地震火災時の不完全情報に基づくリアルタイム避難誘導支援システムの開発, 安全工学シンポジウム 2020 講演予稿集(2020.7.1-2020.7.2, オンライン), pp.98-101, 2020.
- 11) Yuta Suzuki and Eiichi Itoigawa “Safety Evaluation Model of Evacuation Guiding in Real Time Response under Post-Earthquake Fires”, Proceedings of the 4th Asian Conference on Urban Disaster Reduction (USB-Memory), 2017.
- 12) Yuta Suzuki and Eiichi Itoigawa “Effectiveness of Safety Routing Method in Real-Time Evacuation Guidance based on Incomplete Information under Post-Earthquake Fires”, Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Disaster Reduction - Decades Review on Recovery: Learning from Best Practices (USB Memory), 2019.

謝辞

本研究を遂行し学位論文を執筆するにあたり、多くの方々にご支援いただきました。研究を進める中で多くの失敗や脱線がありましたが、ここに学位論文としてまとめることができましたのも、6年間、研究指導に尽力くださった糸井川栄一先生をはじめ、多くの方々の協力のおかげに他ありません。この場を借りて心より感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、本学位論文の指導教官である糸井川栄一先生(筑波大学教授)には、筆者が筑波大学都市防災研究室に配属された2015年2月から2021年2月現在まで約6年間、多忙にも関わらず親身にご指導いただきました。都市防災の基礎知識に加え、情熱とロジックを兼ね備えた防災の考え方についてご教授くださいました。また、研究を進める中、私の考えを尊重してくださり、常に自由に研究活動に励むことができる環境を与えてくださいました。梅本通孝先生(筑波大学准教授)には、防災研で定期的に行われる論文ゼミにおいて、研究テーマを俯瞰したご意見をいただきました。また、梅本先生は防災研出身の先輩でもあり、博士課程の研究生活へのアドバイスや励ましをいただきました。木下陽平先生(筑波大学助教)には、避難誘導シミュレーション実験や評価検証方法の妥当性についてご助言いただきました。

本論文の審査にあたり、鈴木勉先生(筑波大学教授)には、本研究のモデル構築や検証・考察の整理に関してご意見いただきました。また、IWUOR 2019に参加した際、避難者の火災遭遇後の評価に関してご相談に乗っていただきました。川島宏一先生(筑波大学教授)には、本研究のリアルタイム避難誘導支援策の公共における役割についてご意見いただきした。廣井悠先生(東京大学准教授)には、現実の火災避難行動から見たモデルの妥当性や現実への応用方法に関してご意見いただきました。また、毎年、都市防災研究室で開催する夏ゼミにご参加いただき、研究の進捗の度にご助言をいただきました。

また、博士後期課程の学生生活を過ごす中で、多くの方々に励ましをいただきました。地域安全学会で交流いただいた方々には、常に私の研究を気にかけていただき、研究を進める上で大いに励みになりました。筑波大学システム情報工学研究科リスク工学専攻の先生方には、GP-TAや授業のTA・総合研究棟Bでお会いする際、研究の進捗だけでなく研究生活に関して気にかけていただきました。

最後に、筑波大学で7年間、精神的にも経済的にも支えていただいた家族、研究の活力を与えてくれた友人、ゼミの中で共に研鑽し合った都市防災研究室(糸井川ゼミ、梅本ゼミ、木下ゼミ)のメンバーの皆様に、心より感謝いたします。

なお、本研究第4章の避難経路の可視化に用いたGISシステムは、総務省消防庁消防防災科学技術研究推進制度による「地震火災時の不完全な覚知火災情報に基づくリアルタイム避難誘導支援に関する研究」の助成を受けたものである。

2021年2月

鈴木雄太