

博士論文

災害対応ガバナンス醸成のための
シミュレーション型プラットフォームの開発

京都大学大学院情報学研究科
博士後期課程社会情報学専攻

松木 彰

令和6年3月

Copyright Acknowledgement

Much of the research presented in this dissertation has been published in two peer-reviewed publication, three non-reviewed conference proceeding, and two under-reviewed publications.

第 2 章 appears in:

松木 彰, 畑山 満則: 長期浸水域での浸水深さの動的変化を考慮したボート救助戦略立案のためのモデル開発, 情報処理学会, 2022. (査読無)

松木 彰, 畑山 満則: 災害対応プラットフォーム構築に向けた浸水域での救助エージェントモデルの開発, DRIS11, 2022. (査読無)

第 3 章 appears in:

A. Matsuki, M. Hatayama: Survey and Analysis of Residents' Evacuation Attitudes toward Large-Scale Flooding Considering the Phase Shift of Disaster Response, Int. J. Disaster Risk Reduc. (査読あり, 投稿中)

第 4 章 appears in:

A. Matsuki, M. Hatayama: Risk Analysis of Mutual Influence Relationships Among Residents Under Rescue Operations in Long-term Flooded Areas, Int. J. Disaster Risk Reduc. (査読あり, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.104216>)

A. Matsuki, M. Hatayama: Identification of Issues in Disaster Response to Flooding, Focusing on the Time Continuity Between Residents' Evacuation and Rescue Activities, Int. J. Disaster Risk Reduc. (査読あり, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103841>)

第 5 章 appears in:

A. Matsuki, M. Hatayama: Proposal of rescue strategies and evaluation of their effectiveness in long-term flooded areas considering the effect of drainage processing, Int. J. Disaster Risk Reduc. (査読あり, 修正版投稿中)

第 6 章 appears in:

A. Matsuki, M. Hatayama: Building an Agent-Based Disaster Response Platform Using Geospatial Systems, KUSP 国際シンポジウム, 2023. (査読無)

災害対応ガバナンス醸成のための シミュレーション型プラットフォームの開発

松木 彰

内容梗概

気候変動の影響により風水害の被害激甚化が懸念されており、特に多数の要救助者への救助活動の限界が問題となっており、もはや個別の災害対応だけでは対処できなくなっている。そのため複数の災害対応フェーズを俯瞰しこの肥大化する洪水・氾濫への対策を検討できるアプローチを検討していかなければいけない。しかし、非日常的現象である災害に対し時間的・空間的に離れた他の災害対応の動態に意識を向けることは容易ではない。

そこで自然災害モデル・災害対応モデルをひとつのシステム上に統合的に管理することで、俯瞰的な視点での新たな解決策や諸課題を検討するためのツールを開発することを目的とした。今回は洪水・氾濫を対象に、住民避難と救助活動という二つの災害対応フェーズに限定し、実在市街地を対象にシミュレーション環境や各種モデルをプラットフォームとして構成した。それらのプラットフォーム上の各機能を単一に、或いは複数を組み合わせることで、救助活動の限界という洪水・氾濫対策上の課題に対し俯瞰的な視点からの分析や解決案の検討・評価を行えるようにした。

第3章では、長期浸水想定領域に住まう住民の避難意識をアンケートにより把握した。救助活動への意識の欠如や過剰な期待が懸念されることから、救助活動に至るまでの長期的な視点での避難判断の有無を調査し、プラットフォーム上での課題設定とした。第4章では救助活動の限界が住民に与える影響や住民間での影響関係について把握し、水上の救助活動においてもトリアージが深刻であることを示した。また、住民の避難行動と救助活動をまとめて議論し、避難行動の変容により救助活動のパフォーマンスを改善し、結果として住民自身の負担軽減に影響するという関係性を見出した。その際に、長期的な視点での避難判断が従来の避難意識より厳しい要請を住民に課すことも判明した。さらに、第5章ではアンケートの結果からほとんどの住民が浸水域外に避難する事態が想定されたことから新たな救助戦略の提案と有効性の検証を行った。具体的には救助活動と排水処理を結びつけたより強力な救助戦略により、従来よりも多くの住民が救助できることや、住民避難へのより具体的かつ的確な要求を提示できるようになった。

最後に第6章では、本研究で構築したプラットフォームを拡張し今後の活用・展開について述べた。本プラットフォーム構築における工夫や配慮した内容に即し、将来的に地域全体での防災意識を自律的に向上させるガバナンス構造のリスクコミュニケーションの醸成に貢献できるデジタルツイン技術への展望を述べた。

Building a simulation-based platform for fostering disaster response governance

Akira Matsuki

Abstract

Climate change is expected to cause more severe damage from wind and flood disasters, especially the limit of rescue operations for a large number of people in need of assistance, and it is no longer possible to cope with disasters only by responding to individual disasters. Therefore, it is necessary to consider an approach that can consider countermeasures against this growing flooding and inundation by looking at multiple disaster response phases. However, it is not easy to be aware of the dynamics of other disaster responses to a disaster, which are spatially and temporally distant from the disaster, as they are extraordinary phenomena.

Therefore, the purpose of this project is to develop a tool to examine new solutions and issues from a bird's-eye viewpoint by integrating natural disaster models and disaster response models in a single system. In this study, we limited ourselves to two disaster response phases, i.e., evacuation and rescue activities, for flooding and inundation, and configured a simulation environment and various models for a real urban area as a platform. By using a single function or a combination of functions on these platforms, we can analyze the problem of flood and inundation countermeasures from a bird's-eye viewpoint, and study and evaluate solutions to the problem of the limitation of rescue activities.

In Chapter 3, the evacuation awareness of the residents living in the assumed long-term inundation area was ascertained by means of a questionnaire. Since there are concerns about lack of awareness and excessive expectations toward rescue activities, we investigated whether or not evacuation decisions are made from a long-term perspective before rescue activities, and set up issues to be addressed on the platform. In Chapter 4, we grasped the influence of the limit of rescue activities on residents and the influence relationship among residents, and showed that triage is also serious in rescue activities on the water. In addition, the evacuation behavior of residents and rescue activities are discussed collectively, and a relationship is found whereby the change in evacuation behavior improves the performance of rescue activities, which in turn influences the reduction of the burden on the residents themselves. It was also found that evacuation decisions made from a long-term perspective impose stricter demands on residents than conventional evacuation attitudes. In Chapter 5, a new rescue strategy was proposed and its effectiveness was verified, since it was assumed that most of the residents would evacuate outside of the flooded area based on the results of the questionnaire. Specifically, a more powerful rescue strategy that combines rescue activities and

drainage processing can rescue a larger number of residents than before, and can present more specific and precise requirements for the evacuation of residents.

Finally, Chapter 6 describes the expansion of the platform developed in this study and its future utilization and development. Based on the innovations and considerations in the construction of this platform, we describe the future prospects for digital twin technology that can contribute to fostering risk communication with a governance structure to autonomously improve the disaster awareness of the entire community.

目次

COPYRIGHT ACKNOWLEDGEMENT	3
内容概要	5
ABSTRACT	6
目次.....	8
図表目次	11
表目次.....	14
第1章 序論	15
1.1 激甚化する洪水氾濫.....	15
1.1.1 洪水氾濫被害事例.....	15
1.1.2 気候変動の影響による被害の増大想定	16
1.2 洪水氾濫被害事例	16
1.2.1 避難後も続く洪水被害.....	16
1.2.2 浸水域での救助活動の限界	16
1.3 災害対応の連続性を考慮した長期視点からの対策の必要性.....	17
1.3.1 長期化する防災サイクル	17
1.3.2 複雑化する応急対応活動	18
1.3.3 長期浸水の発生に向けた災害対応横断的な対策	19
1.4 防災プラットフォームとガバナンス形成.....	20
1.5 本研究の目的と手順.....	23
1.5.1 研究の流れ.....	23
1.5.2 本研究の立ち位置.....	24
1.5.3 本研究の構成	27
参考文献.....	30
第2章 プラットフォームの構築	33
2.1 プラットフォーム構造	33
2.1.1 防災分野でのシミュレーションの利活用	33
2.1.2 シミュレーションのレイヤー構造	35
2.1.3 シミュレーション間の連携	37

2.2 活動モデリングと環境構築.....	40
2.2.1 人流モデルの整理.....	40
2.2.2 市街地の形状再現モデル.....	43
2.2.3 ベクトルマップの作成.....	44
2.3 シミュレーション環境の作成手順.....	46
2.3.1 道路等ポリゴンの作成.....	46
2.3.2 道路・交差点の識別.....	48
2.3.3 道路ネットワーク及びベクトルマップの作成.....	50
2.4 江東デルタ地帯.....	51
2.5 洪水氾濫シミュレーション.....	57
2.5.1 シミュレーションツールの概要.....	57
2.5.2 シミュレーション間のデータ連携方法.....	57
2.5.3 浸水状況による環境マップの変化.....	58
2.6 各種活動モデル.....	60
2.6.1 住民避難における歩車混合モデル.....	61
2.6.2 浸水域におけるボート救助モデル.....	64
2.6.3 排水処理作業モデル.....	70
2.6.4 各モデルの入出力内容の整理.....	72
参考文献.....	75
第3章 水害救助までの長期的な視点での避難意識アンケート.....	77
3.1 はじめに.....	77
3.2 調査手順.....	79
3.2.1 調査方法.....	79
3.2.2 アンケート内容の概要.....	81
3.3 避難意識の把握.....	83
3.3.1 回答者の背景.....	85
3.3.2 数量化2類.....	88
3.3.3 避難意識に関する回答項目の関連分析.....	90
3.4 救助活動に対する住民の意識.....	94
3.4.1 救助に対する期待.....	94
3.4.2 住民の相互関係性.....	96
3.4.3 住民の避難意識における態度変容の可能性.....	98

3.5 議論	100
3.6 本章のまとめ	102
参考文献.....	104
第4章 大規模洪水発生に向けた長期的な視点での住民避難行動の評価.....	107
4.1 はじめに	107
4.2 救助活動期間中の住民への影響把握	110
4.2.1 手順と操作内容.....	110
4.2.2 各種計算条件の設定	111
4.2.3 シミュレーションの結果.....	114
4.3 長期的な視点での避難行動の評価.....	115
4.3.1 手順と操作内容.....	115
4.3.2 各種計算条件の設定	117
4.3.3 住民の避難シミュレーション.....	125
4.3.4 住民避難後の救助シミュレーション.....	126
4.4 議論	128
4.4.1 救助トリアージの発生.....	128
4.4.2 住民避難状況と救助活動の関係性	129
4.4.3 災害対応の相互の関係性.....	131
4.4.4 総括.....	131
4.5 本章のまとめ.....	133
参考文献.....	136
第5章 排水処理の効果を考慮した長期浸水域での救助戦略の有効性の評価	139
5.1 はじめに	139
5.2 排水処理の効果を考慮した救助活動戦略.....	142
5.3 救助活動戦略の設定.....	146
5.3.1 実大規模の要救助者発生シナリオ	146
5.3.2 排水処理シナリオ	147
5.3.3 救助戦略シナリオ	149
5.4 救助シミュレーションの実施	151
5.4.1 浸水状況に応じた前進拠点の再配置戦略	151
5.4.2 一時搬送拠点の設置と活用	153
5.4.3 住民の地理的位置に基づく優先的救助戦略.....	154

5.5 議論	157
5.6 本章のまとめ	160
参考文献	162
第6章 災害対応プラットフォームの展望	163
6.1 デジタル防災のいま	163
6.1.1 プラットフォームの現状	163
6.1.2 シミュレーション技術の利活用	164
6.1.3 意思決定サポート技術へ	165
6.2 デジタルツインとプラットフォーム	167
6.2.1 プラットフォーム化の必要性	167
6.2.2 地理空間情報ベースの災害対応シミュレーションプラットフォーム	170
6.3 プラットフォーム構築の機能要件の整理	172
6.4 水害対策用のシミュレーション型プラットフォーム	175
6.4.1 本プラットフォームの成果	175
6.4.2 プラットフォームによる洪水・氾濫対策の新知見	177
6.2.2 プラットフォーム上の工夫	182
6.5 今後の展望	183
参考文献	185
第7章 結論	187
謝辞	191
付録	194
図表目次	
FIG.1-1 本研究での水害対応プラットフォームの概要	21
FIG.1-2 シミュレーション運用におけるマネジメントとガバナンスの構造的差異	22
FIG.1-3 災害対応の連続性に着目した新たな解決法の創出	25
FIG.1-4 論文の構成要素の関係性	28
FIG.2-1 統合シミュレーションのレイヤー構造	36
FIG.2-2 環境マップの静的な要素と動的な要素	37
FIG.2-3 災害対応シミュレーションの各レイヤーの情報伝達構造	38
FIG.2-4 形状再現モデルにおける移動表現	43
FIG.2-5 ベクトルマップの作成目標	45
FIG.2-6 道路等ポリゴンの作成手順	47

FIG.2-7 道路・交差点ポリゴンの作成手順	48
FIG.2-8 交差点の判定プログラムの概要	49
FIG.2-9 道路ネットワーク及びベクトルマップの作成手順	50
FIG.2-10 江東 5 区 大規模水害ハザードマップ (出典:[9]).....	52
FIG.2-11 江東デルタ地帯の道路ネットワーク	56
FIG.2-12 洪水氾濫シミュレーションの内部設定・外部入力関係	57
FIG.2-13 人流シミュレーションへの災害状況の入力方法	58
FIG.2-14 浸水状態による移動速度の低減を考慮したリンク重みの計算方法	59
FIG.2-15 浸水深さのメッシュデータをリンクデータへの重みへと変換後の様子	59
FIG.2-16 本プラットフォーム上でのシミュレーションフロー	60
FIG.2-17 歩車混合移動モデルの概要	61
FIG.2-18 衝突回避における HL アルゴリズム[20]	63
FIG.2-19 歩車混合モデルの挙動	64
FIG.2-20 浸水域でのボート救助活動モデル	65
FIG.2-21 エージェント位置における浸水深さと移動手段・速度の関係性	66
FIG.2-22 救助地点及び前進拠点における救助作業プロセスのフロー	67
FIG.2-23 ネットワークボロノイ分割手法によるリンクベースの領域分割例	68
FIG.2-24 救助エージェントの状態遷移フロー	68
FIG.2-25 作成した救助シミュレーションの様子	69
FIG.2-26 排水処理モデルの概要と計算フロー	70
FIG.2-27 住民避難モデルの入出力関係	72
FIG.2-28 救助モデルの入出力関係	73
FIG.2-29 排水処理モデルの入出力関係	74
FIG.3-1 本調査の設問フローと設問内容の概要	81
FIG.3-2 避難行動パターン別救助期間の期待日数	95
FIG.3-3 避難生活中における救助手順への希望	97
FIG.3-4 避難行動パターン別の行動変更結果	99
FIG.3-5 住民の避難行動パターンへの仮説	103
FIG.4-1 浸水域での救助活動下での住民への影響	108
FIG.4-2 想定される救助待機中の住民間の影響関係	110
FIG.4-3 プラットフォームでの操作手順	111
FIG.4-4 ケーススタディにおける初期ボート資源配分と孤立住民の配置	112

FIG.4-5 避難・救助の連続シミュレーションの流れ	116
FIG.4-6 避難・救助の連続シミュレーションの流れ	116
FIG.4-7 江東デルタ地帯内の避難施設と域外避難への出口位置	117
FIG.4-8 江東デルタの建物の高さ分布	118
FIG.4-9 モバイル空間統計に基づく昼間人口分布	118
FIG.4-10 一日の地域人口の割合(A)及び年代人口の構成比の時間変化(B)	119
FIG.4-11 本研究で想定する住民の避難意思決定プロセス	120
FIG.4-12 避難場所の選択モデルのフロー	122
FIG.4-13 避難先選択モデルにおける選好パターンの違い	124
FIG.4-14 ケース別住民の避難完了率の時間推移	125
FIG.4-15 ケース別住民避難における避難場所の変更回数	126
FIG.4-16 要救助者の救助率と避難住民と非避難住民の残存人数の経時変化	127
FIG.4-17 救助の優先度別の救助待ち住民数の時間推移	128
FIG.5-1 プラットフォーム上での操作手順(救助モデル+排水処理モデル)	141
FIG.5-2 排水処理の効果を考慮した新たな救助活動モデルの概要	142
FIG.5-3 新戦略の役割と効果	143
FIG.5-4 救助シミュレーション内の処理フロー	144
FIG.5-5 実大規模の避難状況の様子と排水処理を考慮しない救助活動の効果	146
FIG.5-6 各排水処理シナリオに基づく浸水状況の変化の比較と住民への影響評価	148
FIG.5-7 浸水状況に沿った前進拠点と一時拠点の設置計画	150
FIG.5-8 前進拠点の再配置戦略のパフォーマンス比較と各戦略で救助された住民の位置 ..	151
FIG.5-9 一時拠点からの救助対象者の選択方法と各方針の有効性の比較	153
FIG.5-10 住民の位置情報に基づく優先救助の条件設定と救助パフォーマンスの評価	155
FIG.5-11 一時拠点の配置シナリオごとの救助パフォーマンスの比較	156
FIG.6-1 防災分野におけるデジタルツインのイメージ	164
FIG.6-2 シミュレーション利活用における技術課題	166
FIG.6-3 ユーザーの要求に沿ったシミュレーションの構成①	168
FIG.6-4 ユーザーの要求に沿ったシミュレーションの構成②	169
FIG.6-5 災害対応プラットフォームの構想	171
FIG.6-6 災害対応プラットフォーム上の機能要件の検討	173
FIG.6-7 水害対応プラットフォームの概要	175
FIG.6-8 水害対応プラットフォームの実現範囲	185

FIG.A-1 回答者の災害情報に対する認知傾向の関連表	193
FIG.A-2 回答者のハザードマップ閲覧時期と各イベントの対応(TABLE.A-2).....	194
FIG.A-3 回答者の居住位置と危機意識の関係性	195
FIG.A-4 回答者の救助優先度の高さに対する認識.....	196
FIG.A-5 回答者の避難生活の負担度合いに対する認識.....	196
FIG.A-6 回答者の避難判断変更後の救助時間への期待度	198

表目次

TABLE.1-1 論文の章立て.....	27
TABLE.2-1 人流シミュレーションにおける環境側のモデリング方法の整理	46
TABLE.2-2 全国と比較した江東デルタ地域の共同住宅 3 階以上の住民の割合	54
TABLE.3-1 避難意識調査の実施状況	80
TABLE.3-2 回答者の生活背景の収集結果	84
TABLE.3-3 数量化 2 類の実行結果.....	89
TABLE.3-4 回答者の避難行動パターンごとの詳細分析.....	91
TABLE.4-1 ボートの容量・移動性能.....	113
TABLE.4-2 優先救助者の救助時間の遅延.....	114
TABLE.4-3 ケーススタディでの各操作変数のリスト	125
TABLE.6-1 現状の長期浸水対策の整理.....	179
TABLE.6-2 プラットフォーム上での長期浸水対策の新知見の整理.....	181
TABLE.A-1 回答者の質問回答パターンの分析結果	193
TABLE.A-2 江東デルタ地帯内でのハザードマップの更新歴	194
TABLE.A-3 回答者の居住パターンと被災リスクの認識の関連性	195
TABLE.A-4 救助手順に対する回答者自身の意見および他の回答者の判断予測.....	197
TABLE.A-5 情報提示後の回答者の避難判断の変化	198
TABLE.A-6 2 回目の避難判断への数量化 II 類の適用と 1 回目からの変化	199

第 1 章

序論

1.1 激甚化する洪水氾濫

1.1.1 洪水氾濫被害事例

洪水とは、「河川の水位や流量が異常に増大することにより、平常の河道から河川敷内に水があふれること、及び、堤防等から河川敷の外側に水があふれること」と定義されている[1]。我が国は、過去の幾度の河川氾濫により形成された沖積平野の上に市街地を構築し、多くの人口が集中的に居住するという地形条件と、そして台風等の短期的に多量の降雨が頻繁に発生するという気象条件が重なることで、特に水害が発生しやすい国土となっている。

過去の事例を遡ると、1947年(昭和22年)のカスリーン台風、2015年(平成27年)の関東・東北豪雨、2018年(平成30年)の西日本豪雨、2019年(令和元年)の台風19号、そして2020年(令和2年)の7月豪雨と、豪雨に伴う大規模な洪水被害を幾度も経験した過去がある。これらの事例は市街地の近くを流れる大河川が氾濫することで市街地全体を長期的に浸水させるほどの規模の洪水である。日本という地理がいかに高い水害被害リスクを抱え、そして住民がそのリスクと隣合わせであるかを物語っている。

こうした事例は日本だけでなく、欧州や米国[2]、オーストラリア[3]をはじめとした多くの国で洪水の被害が報告されている。破壊的な被害をもたらす地震や津波といった自然災害のみならず、洪水氾濫への入念な対策が急がれている。

1.1.2 気候変動の影響による被害の増大想定

我が国では、豪雨の発生とともに幾度も大規模洪水の発生を経験してきたが、近年その豪雨被害の発生頻度が高まっている。その背景として、近年の平均気温の上昇や大雨の頻度増加といった、気候変動の影響が明確に表れ始めていとされている。IPCCの報告書によれば、もはや気候変動の影響を無視できないと発表されている[4]。また、地球温暖化による大雨の発生頻度の増加や海面水位の上昇の長期的な変化がデータからも明らかになっている[5]。それを受け、防災分野においても風水害被害の激甚化や、複合的な洪水の発生など、これまでの想定を超える人的・物的被害の発生が懸念されている[6]。令和4年度においても、8月の大雨や台風14号、15号の発生に伴う被害が立て続けに起こっている。

こうした豪雨の発生頻度の増加と豪雨規模の増大に伴い、これまで水害リスクが懸念されていた地域では、より大きな水害を想定した防災計画が求められていく。他方で、これまで水害の発生がなかった地域においても、今後大規模な洪水発生が見込まれていくことと

なるだろう。従来の被災リスクの規模に問わず、全国的に大規模洪水への対策を見直していく必要があるといえる。

1.2 洪水氾濫の対応方針の変化

1.2.1 避難後も続く洪水被害

こうした洪水被害の激甚化は、街で生活する住民自身が被る被害の実態にも変化を与えることとなる。過去の洪水事例では、河川氾濫によって市街地が広範囲で浸水している様子が当時の中継放送で取り上げられていたが、同じくゴムボートによって救出される住民の姿も印象的であった[7]。洪水によって受ける影響といえば建物の倒壊や床下浸水といった物理的な浸水被害が想像しやすい。しかし、浸水した地域に取り残された住民がいれば、その住民の避難生活にも気を配らなければいけない。

気候変動の影響により浸水状態が長期化するとすれば、浸水域内に留まった住民は外部から完全に孤立し、劣悪な環境下で生活しながら救助を待つという事態となる。そうした状況下にあっては、洪水の発生によりガスや電気といったインフラ面の障害や、避難生活における食糧等の物資不足が深刻化する恐れがある。そのため避難生活が長期化することにより、避難生活内での健康被害の増大や、要医療者にとっては命の危険にもつながりかねない。

洪水への従来の防災計画においては、いかに住民を避難させるか、といった避難時の対策が強く追求されてきた。しかし、浸水域内に大量の孤立住民が発生すると見込まれる場合には、上述のように浸水域内の住民が劣悪な状況で避難生活を送るという負担が大きくなっていくと想定される。そこで、今後の洪水の激甚化に備えるには、浸水域内で救助を待っている住民の早期救助を実現するための方針づくりにもより焦点を当てていく必要がでてきている。

1.2.2 浸水域での救助活動の限界

浸水域に残された住民ための救助活動の必要性が高まっているものの、その事情は決して単純ではないことに注意が必要である。そうした内容が、浸水リスクが従来より懸念されている地域の水害対策計画に報告されはじめている。例えば、高知県の宿毛市では、南海トラフ地震による津波に伴う長期浸水地域の発生を想定とした水害対策方針を検討している[8]。また、荒川を囲む東京都の江東5区エリアでも、大規模氾濫に伴う大量の要救助者発生への対策方針が議論されている[9]。これらの対策方針で意識すべき点は、両者とも救助活動そのものの限界を示唆する内容を含んでいることである。例えば、宿毛市の方針では、要救助対象である推定 8,300 人を、三日間という目標期間内に救助しきるためには、現状のボートリソースでは不十分であることや、それを補うために、自力避難が可能な住民には、潮の満ち引

きのタイミングを見て、避難することを想定した対策ケースも提案されている[8]。他方、江東5区では宿毛市よりもはるかに多い要救助者の発生を懸念し、広域避難の実施や建物ごとにゴムボートを配布し、住民の自力避難を要請するといった方向性も検討されている[9]。

両ケースとも想定される要救助者数に対し、現状の救助リソースだけでは救助目標を達成できないことをあらかじめ見込んだ対策であるといえる。こうした事態を克服するには、救助効率の改善や人的・物的リソースの拡充という救助側の対策も有効であろう。しかし、水上での救助活動には特有の知識や能力が求められること[10]や、ボートの補給コストがかかることから、即応的な対策として採用することは難しいといえる。そのため、救助活動としては、住民側の協力的な行動にも期待しなければいけない程の切迫した状況となっていることが伺える。

この問題を住民側の視点で見ると、もはや救助部隊からの公助にだけ依存することができなくなったと捉えることができる。浸水域での救助活動にそもそも限界があるという事態により、浸水域内の住民は救助されない可能性もあるというリスクが新たに発生している。そうした激甚化する洪水被害に対し行政からの公助だけでなく、住民自身による自助の効果を踏まえた対策を検討していかなければいけない。

1.3 災害対応の連続性を考慮した長期視点からの対策の必要性

1.3.1 長期化する防災サイクル

今後長期的な浸水状態がどの地域でも起こりやすくなっていくと考えれば、洪水対策として浸水域での救助方針をも考慮した防災計画を全国的に検討していくことが予想される。しかし、先駆的な取り組みをしている一部の自治体で既に救助活動の限界が叫ばれているなか、今後どのような洪水対策を追求していくべきであろうか。まさに、この問題意識こそ、本研究の起点である。そして、その解決の糸口として、災害対応のフェーズ転換を踏まえた長期的な視点での対策が効果的ではないかというのが本研究の主張である。

そもそも防災活動とは、役割や目的の異なるいくつかのフェーズを包括した循環的なサイクルによる構成されている。それらのフェーズは発災の時点を中心に時間の経過によって相互に転換していくものであり、防災活動そのものが時間連続性を伴った活動の集合体とみなすことができる。具体的には、以下の4つのサイクルで回っている。

1. **予防・減災(Prevention/Mitigation)**: 災害発生前に行うダムや堤防の建設、建物の耐震化等、発災時の被害(Damage)を軽減するための取り組み
2. **事前準備(Preparedness)**: 災害発生前に住民への防災訓練の実施やハザードマップの配布等、発災時に住民が安全な対応をとれるようソフト面からの対策を強化する取り組み

3. **災害応急対応(Response):** 災害直後の救出や救援といった迅速な対応が求められる取り組み
4. **復旧・復興(Rehabilitation/Reconstruction):** 発災後の状況から被害を受ける前の状態へと回復していく段階であり, 災害対応の課題や教訓を今後に活かし, 防災面での強化を図る取り組み

これらのサイクルは, 災害の規模によっては超長期のスパンで実施されることになる。そのことを考慮すれば, 災害直後の応急的な活動だけでなく, フェーズごとに適切な対処をしていくことが重要である。そして, 各フェーズを管轄するステークホルダーも同じでなく, フェーズごとに入れ替わることが一般的である。そのため, 防災は中央政府, 地方政府, コミュニティ, NGO, 学会, 学校, 企業等の関係機関が個別に対応を行うのではなく, 関係機関が連携して対応を行うことが必要である。

この防災サイクルは比較的長期的な取り組みであるが, 災害規模が大きくなるにつれ, 各フェーズに要する時間も伸びていくことになる。例えば, 大規模洪水の発生事例であれば, (3)の「災害応急対応」の期間が延長され, 後続の「復旧・復興」へのフェーズ転換が遅れてしまうことになる。この現象で注意すべきことは, **災害応急対応の期間が伸びることにより活動への時間的猶予が増加したのではなく, むしろ応急対応の緊迫性が深刻化しているという点**である。住民の生命や健康状態に配慮すれば, 応急対応を完遂するまでの時間的猶予はあらかじめ決められており, 要救助者数の増加によって緩和されるものではない。そのため, 膨大な住民を目標期間内に救助するために, より迅速かつ効率的な対応が要求されていくこととなる。

1.3.2 複雑化する応急対応活動

災害応急対応(以下, 災害対応活動)という一つのフェーズのなかでも, 様々な役割の組織が連携して活動している。洪水被害への対応を例にあげると, 住民の避難誘導や孤立住民の救出, 要医療者の搬送, 避難生活者への物資配給, 浸水域内の排水作業, 電気やガスの復旧作業などの多様な活動が同時並行で行われていくこととなる。もちろん, 各活動の主体や指揮系統も異なる場合もあり, またそれぞれの活動が担う役割や目的も異なってくる。そして, 異なる活動主体によって応急対応が構成されているという実態に対し, 近年の災害の大規模化によって個々の活動の役割だけで対処するには扱うべき問題が複雑化してしまい, もはや災害対応の限界が顕在化してしまった事例であると考えている。

小中規模の災害に対しては従来の活動主体ごとの個別的な課題解決方法により対処可能であった。一方で, 大規模な災害への対処を考えた場合, 比較的小さな災害規模では問題にならなかった災害対応活動間の連携に対し, その活動の時間的猶予の切迫性ゆえに, こ

れまで以上に強固な関係を要求することになったのだ。高知県や江東5区の事例であれば、増大する浸水域内の住民の救出というタスクに対し、本来の活動主体である救助部隊の役割だけでは対処できず、救出される側である住民にもその役割を一部担ってもらうという対策となっている。

今後の大規模災害には、もはや個々の災害対応活動の能力だけでは十分には対処できなくなっている。そうした背景にあっては、各活動の従来の役割や目的を超え、複数の活動主体同士が適切に連携し、ひとつの応急対応に対処していかなければいけないのだろう。

1.3.3 長期浸水の発生に向けた災害対応横断的な対策

今後大規模洪水への対策として、どのような検討していくべきであろうか。ここでもやはり複数の活動が連携して対処していくという方向性を改めて追求していくべきであろう。そこで、本研究では災害対応を時間の流れに沿って連続する継続的な活動プロセスであることに注目し、複数の災害対応の横断的な課題解決を図るべきだという立場をとる。個別の活動プロセスだけでは解決できない被害規模が想定されるなか、長期的な視点で現象を捉え、災害対応全体を通じて被害拡大を抑制する解決策を模索していくことを目指していく。

この考えを洪水対策の事例に適用すれば、浸水域内に取り残された住民の救助活動の課題は、救助側が憂慮すべき事象であることはもちろんのこと、救助を待つ住民自身にも影響を与える事象であると捉えることになる。救助活動の限界は、浸水域内に膨大な数の要救助者が発生してしまうことに起因する課題である。本来の救助活動上の問題は住民の防災意識によって少なからず影響を受けているとみなすことができる。実際、住民の避難状況は市街地への浸水到達により決定され、それと同時に救助すべき住民も明白になるという時間的なつながりがある。そのため住民の避難状況が改善され、救助の対象となる住民の数を削減できれば、救助リソースの圧迫を緩和し、救助が必要な住民へとリソースを適切に充てるようになるだろう。そしてその恩恵は迅速かつ確な救助活動の実現によって住民自身に返ってくるはずである。

逆に住民の避難意識やそれによる救助活動前の要救助者の分布が想定できれば、救助活動上の計画の目標づくりや具体的な戦略の立案につなげることができるだろう。浸水状態が長引く場合には強制的に排水を行う必要があるが、この際の活動内容を救助活動と連携させることもできそうだ。例えば、排水処理により浸水状況が徐々に縮小すれば、住民自身が救助を待たずに自力避難できるようになる。こうした効果を救助戦略に活かすことができればより多くの住民の救助にもつながるだろう。

このように大規模洪水の発生においては住民の避難行動と救助活動は一体的に考えて

いくべき問題であるだろう。しかし、非日常的現象である災害に対し時間的・空間的に離れた他の災害対応の動態を想像することは困難である。そのため、こうした避難と救助の関係性について包括的に認識することも容易ではない。その原因としてその活動主体である住民や救助部隊がこの問題に対し考えるきっかけやツールが不足していることが考えられる。そこで災害という稀有な現象に対し、防災対策を俯瞰的に考える仕組みを準備しなければいけないだろう。

1.4 防災プラットフォームとガバナンス形成

防災分野の研究が他の分野・領域と決定的に異なることは、研究対象となるものがまだ起こっていない、あるいは起こるかもしれないという不確実な未知現象(Unknown Event)だという点である。将来的にどのような災害が起こるかを完全に予測することは困難であるし、その災害に対する対応方針・施策の有効性を直接検証することはもはや不可能である。この点を踏まえれば、住民にとって水上での救助活動の実態やそれが自身に与える影響を把握する術がないことも、住民の意識変容が実現できない原因にもなりうる。そうした未知の災害現象のインパクトやリスクを評価するうえで、これまでシミュレーション技術が活発に利用され、また今後もその活用により一層の期待が寄せられている。

そこで本研究ではシミュレーション技術を積極的に導入することで、未知の現象に対するリスクを自由に検討できる枠組みをシミュレーションベースのプラットフォームとして展開していくことを目指していく。プラットフォームという言葉に対する明確な定義を示すことができないが、本研究が提案するプラットフォームとは、「デジタル上のサービスが一般のステークホルダーに解放されており、自身が関心・懸念を持つ課題に対して高度な技術を自由に適用することが可能であり、また新しい知見やサービスを他者に共有することができるような、ステークホルダー間で社会課題を議論できる創発的な場(システム)」であると定義する。

防災でのプラットフォームといえば、A)事前計画として Plateau や Fiware などの都市のデジタルデータ基盤の整備・拡充、B)監視として、地震度計や河川水位計等の広範囲の ICT センサーネットワーク網、C)非常時の即時対応として、国家プロジェクト SIP4d により非常時の網羅的なデータ共有基盤があげられる。こうしたデータを蓄積するデータプラットフォームの整備は進められているが、他方でそのデータを用いた意思決定技術やその社会適用があまり進んでいない。いま防災技術で求められているのは、「**災害の姿(被害)を知り、じゃあどうすればいいのか(対策)を考える仕組み**」であろう。そのためにも、意思決定ツールとして、シミュレーション技術を広く普及するためのプラットフォームが必要であると考えられる。そうした目的のため、本学プラットフォーム学卓越対学院での活動成果として、

『地理情報空間システムを用いたエージェントベースの災害時対応プラットフォームの構築』と題し、シミュレーション技術の普及及び一般利用を促進し、防災課題をその当事者間で横断的に議論するための場の提案をする。

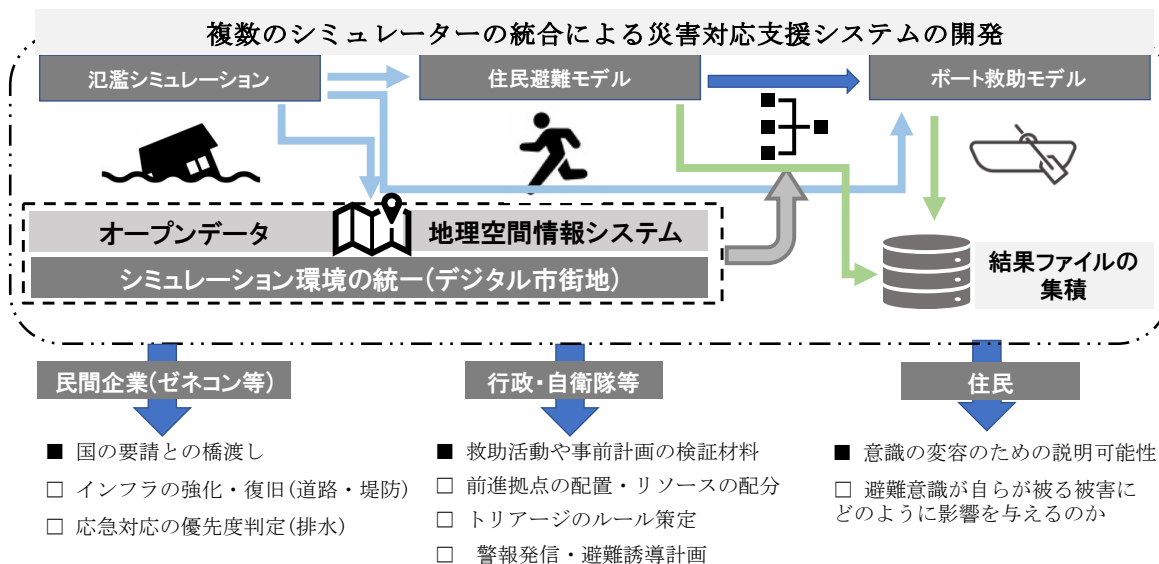


Fig.1-1 本研究での水害対応プラットフォームの概要

災害対応に関するシミュレーション技術をプラットフォーム化する理由は二つ挙げられる。ひとつは、個別の災害対応、あるいは複数の災害対応に関するシミュレーションを用いた防災計画の立案をより促進するためである。災害といった非日常的な現象への対策を検討するには、シミュレーション技術をはじめとしたデジタル技術に頼らざるを得ない。シミュレーション上では、どのような規模や種類の災害を発生させることができ、またその災害への対応も自由に検証できる。その強みを活かし、災害対応の当事者である住民や各部隊が仮想的に災害対応を体験できる技術にも転用されている(例えば、片田ら[11])。直接的に経験することが困難な大規模災害に対し、時間や場所に制約をかけることなく、災害対応を試せるため、幅広い視点で防災計画を評価・策定できると期待される。洪水対策で言えば、住民が普段の避難意識への改善点や救助活動の実態を踏まえた避難行動計画を検討できるきっかけを生み出すことにつながる。また、住民による避難状況が想定できることになれば、浸水域での救助戦略の策定を支援することができる。

しかし高度な技術であるが故に、現場の人間がうまく操作できないことや分析できず、防災計画へのシミュレーションの利活用はいまだ進んでいない。また本研究が提案する複数の災害対応を踏まえた対策を立案する際に、個別のシミュレーションを用意するだけでは要求に応えられない。そこで、ひとつのシステム上にさまざまなシミュレーションやデ

一タを統合することで、複数の災害対応を掛け合わせた対策を計画・評価・分析できる仕組みを創出する用意する必要があるだろう。災害時、あるいは平常時においても、特定の活動以外の災害対応の役割や効果を把握することは難しい。プラットフォームでは、そうした普段関わることがない災害対応の機能をも自由に扱えるようにし、災害対応横断的な意思決定をサポートすることを目指す。

もう一つの理由は、こうしたシミュレーション技術の利用主体を地域の住民や行政の職員といった非専門家まで拡張することである。シミュレーション技術を用いた住民(あるいは行政)とのコミュニケーションでは、概して専門家がコミュニティに介入するケースが多くある。これはシミュレーションの挙動や操作に通じている専門家が中心となってコミュニケーションをとることで、技術になじみのないステークホルダーでも議論に参加することが可能になるというメリットがある。しかしこうしたコミュニケーションでは、専門家からの一方的なリスク提示になることや、全国各地で専門家が防災計画の策定や防災イベントに参画することは不可能である。

災害リスクやその対策方法は地域によって特徴付けられるものであり、そうした観点からも地域ごとにその地域内のステークホルダーが防災を検討するほうが望ましい。つまりは、これまでのリスクコミュニケーションから専門家の存在を排し、かつシミュレーション技術を誰もが操作でき、解釈できる道具として昇華させる必要があるのではないだろうか。プラットフォーム上ではあくまでも地域の住民・組織・行政を主体としたコミュニケーション方法を構築することで、各主体が災害対応を考えられる機会を創出し、防災活動における地域内のステークホルダーの主体性を育むことができると期待する。

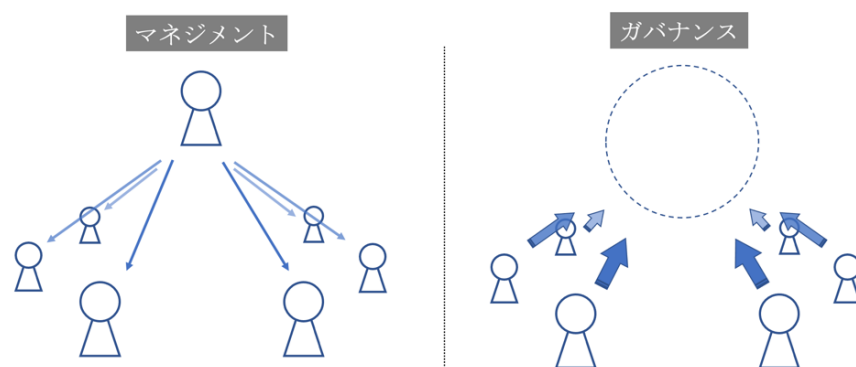


Fig.1-2 シミュレーション運用におけるマネジメントとガバナンスの構造的差異

災害対応を地域の住民・組織・行政というステークホルダーが直接体験できるという点においては、特に行動変容に欠かせない旧行動からの脱却という最後のピースを埋めることが期待できそうである[11,12]. リスクコミュニケーションを地域のステークホルダーだけ

で実行する目的は、専門家から提供されるリスクを受け取るだけのマネジメント状態から脱却させることにある (Fig.1-2)。各ステークホルダーが自ら課題について深く考えお互いに共有することで、地域全体での防災意識を自律的に向上させるガバナンス状態を構築することにある。マネジメント構造の課題には、リスクを提供する側と受け取る側という対称構造にある。この構造により地域内のステークホルダー自身がリスクを検討する機会を消失し、また専門家への依存性を高めてしまう。

長期浸水対策に置換すれば、たとえば救助する側(救助部隊)と救助される側(住民)という構造を残すことで、住民自身が救助活動上のリスクを過小に評価してしまう恐れがある。“救助はされるものである”という認識が住民に残ることで、避難するという判断の優位性が減ってしまい、本来の問題意識にある救助リソースの圧迫を緩和することができない。この問題に適切に対処するためにも、リスクコミュニケーションの当事者を救助する側(救助部隊)と救助される側(住民)といった2層に分けるのではなく、そもそも1層を完全に排除することで住民同士だけで議論できる場を整える必要があるだろう。

このように、災害対応におけるシミュレーション型のプラットフォームを構築することにより、1)災害対応を俯瞰的に捉えた新たな解決方法の作成・検討できる思考の場を提供すること、2)その操作を地域のステークホルダー自らが行えるようにすることで、地域の住民・組織・行政の特質にあったより良いリスクコミュニケーションを創出すること、が実現できるだろう。

1.5 本研究の目的と手順

本章の最後に、本研究の問題意識や解決方法、解決に至るまでの方法を整理する。

1.5.1 研究の流れ

まず本研究の問題背景として取り上げたのは、今後発生が想定される長期浸水地域における救助活動の限界である。その解決にはもはや救助活動のフェーズだけの問題として対処するのではなく、災害対応の複数フェーズを横断した長期的な視点での解決アプローチを提案した。具体的には、救助活動前の避難状況を形成する住民自身にも関係のある課題であると捉え、住民側と行政側で一体的に対処するという方向性を示した。

しかし、非日常的な現象である災害対応において、俯瞰的な視点でのリスクの存在や対策の有効性を日常的に検証・理解することは不可能に近いという課題があった。その対処方法として、シミュレーション技術を用いた擬似災害対応体験プラットフォームの価値を取り上げた。また技術を用いた防災意識の向上を全国的に普及させるためにも、既存のマネジメント的なリスクコミュニケーションから脱却し、地域内で完結できるガバナンス的なコミュニケーション構造を構築する必要性を説いた。その実現のためにシミュレーショ

ン技術を誰でも扱える道具として普及するため、シミュレーションベースの防災プラットフォームの展開を提案した。そこで今回は洪水・氾濫を対象に、住民避難と救助活動という二つの災害対応フェーズに限定し、実在市街地を対象にシミュレーション環境や各種モデルをプラットフォームとして構成することを検討する(第2章)。

つぎに本研究の具体的な進め方を説明する。洪水氾濫発生における住民の避難行動とその後の救助活動の関係性について議論するには、まず現状の住民の避難意識やそれに基づく浸水域の救助活動の課題について把握することから始める。そのため、「水害リスクの高い地域の住民が現状抱えている避難意識のうち、救助活動を含む長期的な視点で判断できているのか」を調査する(第3章)。この結果を踏まえ、住民の避難計画においてどのようなリスクや知見をプラットフォームから出力すべきか検討していく。あるいは、現状の住民の避難意識から推測される要救助者の発生に対し、具体的な救助戦略の立案をプラットフォーム上で検討していくことになる。

次の段階として、まずは住民側の視点で「そもそも水害対応の救助活動において何が問題となりえるのか」を確認し浸水域での救助活動そのもの課題を整理し、住民に関わるリスクを定義することから始める。そして「救助活動前の住民の避難行動がその後の救助活動にどのような影響を与えているのか」を確認し、住民の避難行動の改善が、結果として救助活動のパフォーマンスを改善するという時間的なつながりを確認する。ここから、住民の避難計画に必要な情報を引き出すことを目指す(第4章)。

一方で、住民が避難しないという救助活動上の最悪なケースに備え具体的な方向性を打ち出す必要があるだろう。そのため、今度は排水処理作業の効果も見込んだ救助戦略を構築し、救助活動側の改善による住民の救助数の増加及び救助活動計画への提言を行う(第5章)。複数の災害対応を踏まえた解決方法を模索するという目的にあわせ、住民の行動変容の不確実性を補完する観点からも、より具体的な洪水対策を提案する。最後に、これらの複数の災害対応を俯瞰的に捉えた防災計画立案をサポートする仕組みをプラットフォームとしての価値を議論することにする(第6章)。

1.5.2 本研究の立ち位置

次に本研究の目的・価値を既往の研究事例と比較し、その立ち位置を説明する。

本研究は災害対応に関するシミュレーション型プラットフォームを構築し、昨今の大規模災害に対する俯瞰的な解決策を検討できる思考の場の価値を提案するものである。今回は洪水・氾濫に伴う長期浸水被害に対し、住民の避難行動と救助活動という二つの災害対応に限定して議論する。従来の研究事例では、個々の活動フェーズに特化した問題意識や解決方法が模索されてきた。そうした視点と異なり、本研究ではこの二つの活動フェーズ

を踏まえ、より広い視野により洪水・氾濫対策の課題や解決策を検討しようと試みる (Fig.1-3). もちろん、こうした従来と異なるアプローチをプラットフォーム上で実現することで、新規の課題や打開策を見出せなければいけないが、同時にその可能性にも期待ができる。この点について、水害時の避難行動・救助活動に関する過去の研究事例をもとに説明する。

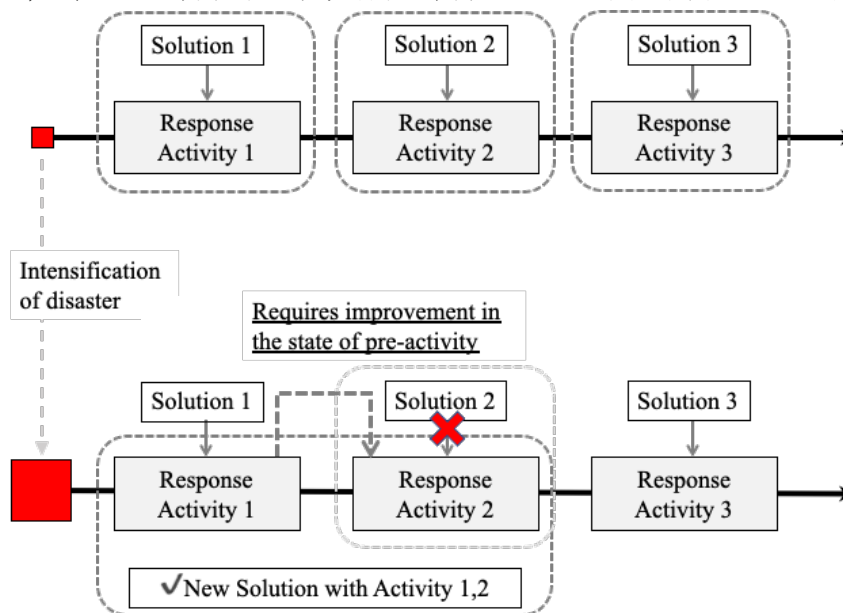


Fig.1-3 災害対応の連続性に着目した新たな解決法の創出

・住民の避難行動

住民の避難行動には、実際の被災事例からの調査ベースでの研究や、シミュレーションを用いた仮定ベースでの研究が数多くされている。

調査ベースでの研究では、被災した住民の行動把握や意識調査を実施することで、避難行動の背景にある潜在意識構造の解明や避難行動のあり方の模索を主な目的としている。前者に関しては、洪水・氾濫時における住民の避難行動の大きなトピックは、「なぜ住民は避難しないのか」という疑問に関する内容が多く、過去の調査事例でも常に議論の中心となっている (例えば、田中らのレビュー事例[13])。こうした調査結果から、住民の避難意識のモデル化を試みる研究もされている[14-16]。

しかし調査ベースの研究にはその試行数に限界があることから、仮定的な状況下での課題発掘や解決策の検討をシミュレーションで行う研究も重視されている。風水害に関する避難行動については、避難場所の選択や避難遅れ、避難経路の混雑による被災リスクの評価[17-19]をはじめとし、避難施設の容量問題[20]やシャドーエバキュエーション(Shadow Evacuation)[21,22]と呼ばれる避難マネジメント型の課題が提示されている。

このように住民避難の研究は多様な視点かアプローチから取り組まれているが、その主

な目標は「早期の安全状態の確保」を実現するための避難方策を実現することにある。避難意識モデルの構築は避難心理の把握による的確な避難誘導策を検討するためのひとつの手段であり、シミュレーションを用いた研究も安全な避難シナリオの発見・創出のために行われている。そのため、避難というフェーズに限定すれば、「避難しない」という選択も善しとみなされる場合もありうる。例えば、矢守[23]は「次善」という無理なく実行できる避難行動のあり方を示している。

「避難しない」は最も簡易に実行できる避難判断であり、洪水・氾濫の際に安全を確保するという点においてはとても有力であると考えられる。しかし、長期浸水が発生するという点、つまりはボートでの救助活動を行うという観点では、要救助者の数を増やすことにもつながっている。浸水域での救助活動において場合によっては2週間以上も浸水域内の避難生活を過ごすという住民の負担を考えれば、避難を終えたからといって事態が解決しているとは限らないことに注意が必要である。

このようにこれまで追究されてきた避難時の判断でなく、より長期的な視点で避難行動を見直しが求められるなか、これまでとは異なる問題意識に答えていかなければいけない。本研究ではこの俯瞰的な視点での課題設定や解決方法をプラットフォーム上で検討する。

・浸水域での救助行動

浸水域でのボート救助活動に関する文献はまだまだ少ない[24,25]。池内ら[24]は、今後の発生が想定される大規模水害に向けて、孤立住民数や孤立時間の推計及び救助活動、排水施設の稼働、避難率の向上による孤立住民数の軽減効果を分析している。この研究の中で、各孤立者の位置と付近の非浸水域までの距離の平均値からボートの移動距離を設定しそれにボートの移動速度を適用することで、時間ごとの救出数を算出するモデルを構築している。一方で、坂本ら[25]は、長期浸水域に残された要医療支援者に限定して、アクセシビリティ指標を用いたボートの搬送計画モデルを構築し、効率的に搬送するための最適なボート配置を提示している。

これらのモデルを用いれば、救助リソース数や配備シナリオによって救助時間の算定が容易に行えることが利点である。しかし、現状のリソースや運用戦略だけでは、大規模要救助者の発生に対応できないことはすでに明白である。そのためには、住民の避難行動の改善や、排水処理の効果に期待せざるを得ない。しかし、1) これらの研究では前者の避難行動の変容理由に必要な住民視点での救助活動の課題認識が分析できていないこと、2) 後者の排水処理を用いた戦略について、池内ら[24]のモデルでは詳細な対策にまで議論を展開できていない、ことが課題であると考えられる。

救助活動という活動フェーズにおいては、いかに住民を迅速かつ効率的に捜索・救出できる戦略を立案することが主な目的となっている。しかし、救助活動だけでは対処しきれない洪水・氾濫

規模に対し、従来のアプローチでは力不足であることは否めない。そこで、俯瞰的な視点で戦略の立案をプラットフォーム上で議論することとなる。

この点に関し、現実の防災計画ではより俯瞰的な視点での救助活動対策の必要性が議論されはじめている[8,9]。これらの計画は既往の研究や発想に基づき立てられているが、それ故に真に俯瞰的な視点での問題意識や解決策が見出せていない可能性がある。シミュレーションベースの災害対応プラットフォームにより、どのように新規の視点で洪水・氾濫対策を検討できるようになったかは、本プラットフォームの価値を議論するうえでとても重要である。この点については、6章で議論することとする。

1.5.3 本研究の構成

改めて本研究の構成を Table.1-1 に示した手順とした。以下、各章の概要をまとめる。

Table.1-1 論文の章立て

章番号	章名	記述内容
1	はじめに	研究の背景, 研究の目的, 研究手順
2	プラットフォームの構築	本プラットフォームで使用するシミュレーションのシステム構成や地理空間ベースのシミュレーション環境の構築を説明する。また、今回の災害対応内容を洪水・氾濫における住民避難と救助活動の2つに限定し、プラットフォーム上に各種活動モデルの定義・実装する。
3	水害救助までの長期的な視点での避難意識アンケート	住民避難と救助活動の連携に潜むリスクについて、地域住民の現状の避難意識を分析・把握する。この結果は住民の避難計画や具体的な救助戦略の立案をプラットフォーム上で検討する上での課題設定として利用する
4	大規模洪水発生に向けた長期的な視点での住民避難行動の評価	洪水対策における救助活動の限界を、住民視点でも課題である捉え直し、具体的な避難行動の見直しやそのリスクを把握する。そこで、まず救助シミュレーションにより浸水域での救助活動中の住民への負担や住民同士の影響関係の分析を行う。次に、住民避難のモデルとボート救助モデルの時間的に連続したシミュレーションを通し、住民の避難意識が結果的に救助活動のマネジメントにどのような影響を与えているかを考察する。救助活動を見据えた長期的な視点での住民避難の対策や課題を検討する。
5	排水処理の効果を考慮した長期浸水域での救助戦略の立案と有効性の評価	3章での住民避難の結果を踏まえ、プラットフォーム上の救助モデル及び排水処理モデルを組み合わせ、排水処理作業の効果を考慮した新たな救助戦略を立案する。その救助パフォーマンスを評価し、より多くの住民を救助できることや今後の洪水対策への提言を行う
6	災害対応プラットフォームの展望	災害対応プラットフォームの利活用や本プラットフォームの今後の展望について
7	まとめ	研究のまとめ

第2章では、本研究のシナリオ分析対象とした実市街地のシミュレーション用の環境構築手順について説明する。諸々のシミュレーションやその後のプラットフォーム構築時の地理空間基盤となるため、共通要素であるシミュレーションマップの構築手順については前もって整理した。また、本研究が想定する災害対応上の課題を洪水・氾濫発生時における住民避難と救助活動に限定し、各種活動モデルの定義や実装を行う。これらのシミュレーション環境やモデルは既にプラットフォーム上で準備されており、各課題設定に応じ適宜利用されることとなる。実際の利用ケースは第4,5章で詳細に述べる。

第3章では、住民の避難行動とその後の救助活動との影響関係について、その水害リスク

に晒されている地域住民の現状の意識を調査する。今後水害被害の長期化が見込まれ、救助リソースの不足が懸念される地域に住まう住民を対象に、Web 上での避難アンケート調査を実施する。特に、高層建物が多く立ち並ぶ都市部においては、避難しないことを選択優位性が高くなると想定されるため、これまでの議論における水害対応上のリスクをより助長する可能性がある。そこで、これらの住民の意識に基づく問題構造を都市型水害特有のリスクとして定義し現状の住民の意識内に存在しうる課題かを確認する。またその結果を踏まえ、住民の避難態度のあり方や救助戦略の内容について具体的なアプローチを検討する。

第4章では、住民側の視点から救助活動の限界を踏まえた避難計画についてプラットフォーム上で検討していく。そのためにも浸水域での救助活動が住民にとってどのようなリスクが発生しているのかを考察する。水上での活動は域内の環境的制約やボートの機能的制約をうけるため、陸上よりも厳しい状況下での活動を強いられる。そこで水害時の救助シミュレーションを実施するとともに、域内の孤立避難者の救助におけるリソースの配分におけるジレンマ的構造について議論する。また、具体的な避難行動プランをプラットフォームから検討・比較することとする。具体的には複数の避難先決定シナリオをシミュレーションに導入し、避難行動の違いによる水害時の孤立避難者数の変化や、その後の救助完了時間への影響を考察する。また、選択した行動がその住民自身にどのような影響となって返ってくるのか、避難判断上の短期的・長期的視点でのコストとベネフィット構造について議論する。

第5章では、第3章でのアンケート結果を踏まえ、住民の避難意識が依然と改善しない場合に対し、多くの住民を助けるための方策をプラットフォーム上で検討する。具体的には、

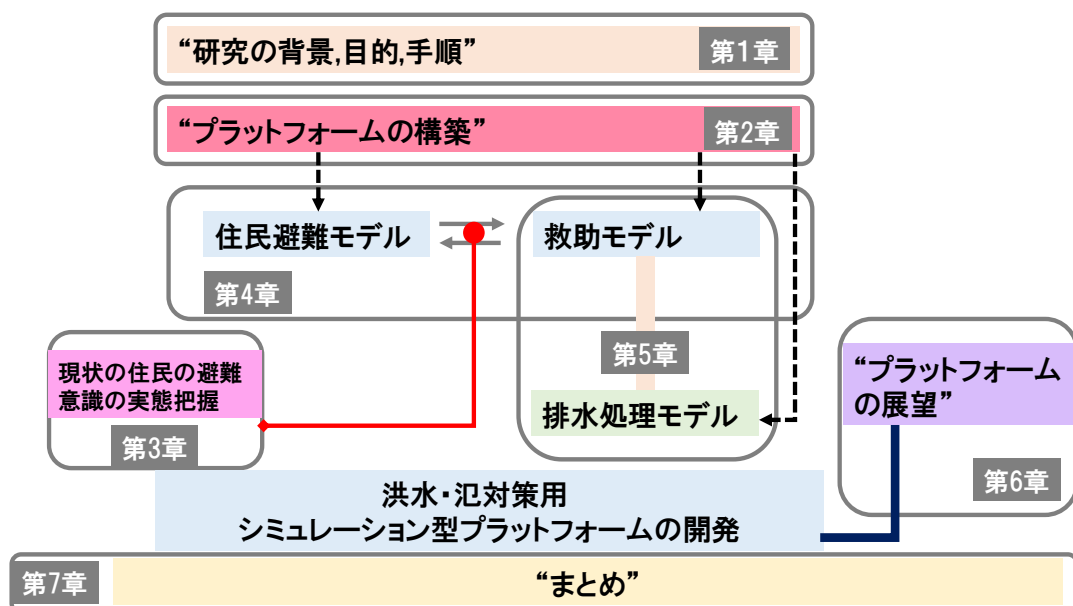


Fig.1-4 論文の構成要素の関係性

救助活動の実施と同時並行に行われる排水処理作業の効果を取り入れた新たな救助モデルのパフォーマンス評価を行う。最大限の救助パフォーマンスでも救助できない住民を特定することで、そうした住民の存在を踏まえた具体的な洪水対策への提言を行う。

第6章では、ここまでで構築した水害対応シミュレーションを拡張し、プラットフォーム構築の提案と利活用の展望を議論する。稀有で局所的な発生となる災害において、防災上の課題を発見する道具として、地理空間情報に基づくシミュレーションの活用は重要である。他方、シミュレーションを一般に活用する上で、データの整備状況やシミュレーションシステムの構造、シナリオ作成やアウトプットの理解など、諸々の課題が残存している。そこで、ここまでのシミュレーション開発の経験を活かし、災害対応シミュレーションのプラットフォーム構築の提案をする。

第7章では、最後に本研究のまとめを述べる

なお、ここまで述べた各章の関係性については、Fig.1-4 にまとめた。

—参考文献—

- [1]. 気象庁, “河川,洪水,大雨浸水,地面現象に関する用語”, Available online: https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/yougo_hp/kasen.html
- [2]. Jonkman, S. N., and Kelman, I., “An Analysis of the Causes and Circumstances of Flood Disaster Deaths”, *Disasters*, 29(1), pp.75-97, 2005.
- [3]. FitzGerald, G., Du, W., Jamal, A., Clark, M. and Hou, X.-Y., “Flood fatalities in contemporary Australia (1997–2008)”, *Emergency Medicine Australasia*, 22, pp. 180-186, 2010. Doi: 10.1111/j.1742-6723.2010.01284.x
- [4]. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [5]. 気象庁, 気候変動監視レポート, 2023. Available online: <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/index.html>
- [6]. 内閣府, 令和5年版防災白書, 2022. Available online: <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r5.html>
- [7]. NHK, 『水害の過去を知る そしてハザードマップで確認を』, 2023. Available online: https://www3.nhk.or.jp/news/special/saigai/natural-disaster/natural-disaster_18.html
- [8]. 高知県宿毛市, “南海トラフ地震宿毛市長期浸水対策”, 2021.
- [9]. 江東5区大規模水害対策協議会, “江東5区大規模水害避難等対応方針”, 平成28年8月.
- [10]. 総務省消防庁, 第2回“大規模自然災害に伴う浸水区域における救助技術の高度化に関する検討会”, 平成29年11月.
- [11]. 藤井聡: 土木計画のための社会的行動理論 -態度追従型計画から態度変容型計画へ-, 土木学会論文集, No.668/IV-53, pp. 19-35, 2001.
- [12]. 藤井聡: 交通計画のための態度・行動変容研究 -基礎的技術と実務的展望-, 土木学会論文集, No.737/IV-60, pp. 13-26, 2003.
- [13]. 田中皓介, 梅本通孝, 糸井川栄一, “既往研究成果の系統的レビューに基づく大雨災害時の住民避難の阻害要因の体系的整理”, 地域安全学会論文集, No.29, pp.185-195, 2016.

- [14]. 大友章司, 広瀬幸雄, “自然災害のリスク関連行動における状況依存型決定と目標志向型決定の2重プロセス”, 社会心理学研究, 第23巻, 第2号, pp.140-151, 2007.
- [15]. 柿本竜治, 上野靖晃, 吉田護, “防護動機理論に基づく自然災害リスク認知のパラドックス検証”, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.72, No.5, (土木計画学研究・論文集第33巻), pp.-I_51-I_63, 2016.
- [16]. 宇田川真之, 三船恒裕, 定池祐季, 磯打千雅子, 黄欣悦, 田中淳, “平常時の避難行動意図に関する汎用的な調査フレーム構築の試み”, 災害情報, No.17-1, pp.21-30, 2019.
- [17]. 横山宗一郎, 安藤宏恵, 倉内文孝, 杉浦聡志, “徒歩と自動車の混合モードにおける津波最適避難計画”, 第53回土木計画学研究発表会・講演集, pp.2167-2174, 2016.
- [18]. 中居楓子, 畑山満則, 矢守克也 “マルチエージェントシミュレーションを用いた歩車混合の津波避難に関する研究”, 第回日本自然災害学会講演, 2015.
- [19]. 片田敏孝, 桑沢敬行, 信田智, 小島優, “大都市大規模水害を対象とした避難対策に関するシナリオ分析”, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.1, pp.71-82, 2013.
- [20]. 竹内光生, 近藤光男, 山口満, 渡田洋平, “容量を考慮した津波避難場所の評価に関する実証分析—須崎市を対象として—”, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, No.2, 2003.
- [21]. Jerry, T et al., “Improving shadow evacuation management: Case Study of the Graniteville, South Carolina, chlorine spill”, Journal of Emergency Management, Vol.5, No.1, 2007.
- [22]. Dash, N et al, “Evacuation decision making and behavioral responses: Individual and household.” Nat, Hazards Rev., 8, 69-77, doi:10.1061/(ASCE)1527-6988(2007)8:3(69).
- [23]. 矢守克也: 「避難学」を構想するための7つの提言, 災害情報, No. 18-2, pp. 181-186, 2020.
- [24]. 池内幸司, 越智繁雄, 安田吾郎, 岡村次郎, 青野正志, “大規模水害時における孤立者数・孤立時間の推計とその軽減方策の効果分析”, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.3, pp.145-154, 2011.
- [25]. 坂本淳, 小笠原誠, 石川ひとみ, “長期浸水域内からの要医療支援者搬送計画モデルの適用と救出シミュレーション”, 交通工学論文集, 第5巻, 第2号(特集号A), pp.A_11-A_19, 2019.

第2章

プラットフォームの構築

2.1 プラットフォーム構造

本章では第4章以降で使用する洪水・氾濫対策用の災害対応プラットフォームの概要について説明する。本研究では、水害対策のなかでも住民の避難行動と浸水域での救助活動に限定してプラットフォームの構築を目指す。災害対応における住民避難や救助活動といった活動内容をシミュレーション上で記述するには、市街地内を移動するという表現を計算機上で再現しなければいけない。つまり、市街地の道路形状や建物配置といった物理空間での移動上の制約（例えば、屋外では道路や歩道の上での移動に限定するなどの移動経路上の常識的な条件）を踏まえた活動モデリングの必要がある。その際には、人の挙動だけでなく、市街地等の環境側の状況を活動モデル内で参照できる仕組みが求められる。そのため、プラットフォームを構築する上では各災害対応の活動モデルと同時、その活動の場である環境マップを付随して準備しなければいけない。そこで本節ではまずプラットフォームの構築に必要な各要素や、それらの連携方法について説明する。

2.1.1 防災分野でのシミュレーション

シミュレーション(Simulation)とは、複雑な挙動を示す現実事象を抽象的かつ理解できる形で記述した式(Model)を用い、現実世界を模したシステムを直接操作できるようにした模擬実験のための道具である。その対象となるものは交通流などの社会現象、政治経済、輸送といったスケールの大きいマクロな現象から、化学反応や物理現象など人の目では直接捉えられないミクロなスケールと広範で多様である。シミュレーションでは、現実事象をデジタル空間といった仮想世界上で再現し、対象物を直接操作、あるいは影響を与える因子を導入することで、環境に対し諸活動がどの影響を与えるのか、そして環境からどのような影響を受けるのかといった関係性を把握することができる。シミュレーションそのものは計算機の上で実行されるため、現実では実行できない規模の実験に対し、代替的な手段を提供する。特に、実際に発生させることや、直接影響関係を把握することに大きなリスクが生じ、自由にコントロールできない自然災害といった現象の解明において、シミュレーションの果たす役割はとても大きい。

シミュレーションが適用される分野は多岐にわたるが、防災分野に関しては大きく二つの分析対象に分類できると考えられる。

A) 自然シミュレーション：地震や火災、洪水といった自然界の現象に対し、物理的な方

程式をもとに、過去の挙動の説明や未来の災害の予測を行う。背景にある物理モデルと過去の災害事例の記録を比較することで、シミュレーション精度そのものを直接評価することもできる。

B) **社会シミュレーション**:住民の避難や救助活動といった人流, 経済インパクトの評価など, 自然災害に対する社会や人への影響を評価するためのシミュレーション。

これらの二つのシミュレーション形式では分析対象そのものは異なるがそれらの知見は互いに補完しあう関係にある。具体的には今後発生が予測される未知の災害に対し具体的な対策を実施することは防災分野の最大の目的であるが, そのためにもまずどのような災害が発生するのか, その被害はどの程度であるのか, を自然シミュレーション(A)で把握する必要がある。自然現象の解明や予測は, 対処すべき自然災害の様相を明確に定義し, 現状の取り組みに対する問題提起を行うことにつながる。しかし, 問題の解明だけでは被害を低減することはできないため, ではどうしたら良いのか?といった具体的な対策を社会シミュレーション(B)で評価することとなる。

本研究が問題とする災害対応上の課題はまさに社会シミュレーション(B)が対象とする領域である。つまりは, 住民の避難行動や救助部隊の活動をモデルとして記述し, それぞれのステークホルダーが被る洪水現象から被害・影響度合いを評価し, 逆にそのインパクトをどの程度軽減できるのか, そしてステークホルダー間でお互いにどのような影響を与え合っているのかを調査することになる。災害対応の分析・評価をするうえには, 具体的な災害状況のシナリオが必要となるため, 社会シミュレーション(B)の実施には自然シミュレーション(A)の活用が欠かせない。こうした狙いから災害対応プラットフォームとしては, 自然シミュレーション(A)と社会シミュレーション(B)の双方を用意することになる。

なおこれから構築する各種シミュレーションの妥当性や予測精度については注意深く解釈しなければいけない。シミュレーションでは特定の現象を説明するために, その現象の背後にある原理を簡易的に記述し, それにより既知の現象の解釈や未知の現象への予測を提供する。このシミュレーションから有意義な知見を引き出すためには, シミュレーションそのものの妥当性が一定以上認められる必要がある。しかし, 災害対応に関わる人活動の社会シミュレーション(B)の予測精度や説明力を評価することは一般的に難しい。

本来シミュレーション技術の妥当性評価(Validation)作業では, シミュレーションの予測対象であるイベントに関する観測データを用いシミュレーションの挙動がどの程度データに適合しているかを比較される。例えば, 日常的な交通流の予測では交通量調査の結果を正解データとみなし, 交通流モデルの評価に役立てている。シミュレーションの妥当性を評価するにはこうした観測データが必要となってくるが, 非日常現象で災害対応におい

では、現場での混乱により活動記録が残っていないことやそのデータが十分に整理された形で収集されていないことが通常である。特に人の意思決定が介在する災害対応シミュレーションの妥当性を適切に評価することもできていない。そうした事情があるとしても未知の現象に対しシミュレーション技術の活用が必要となっていることが防災分野におけるシミュレーション技術の扱いに慎重にならなければいけない要因となっている。

こうした観点から、特に人行動を扱う本研究ではシミュレーション技術をリスク発見のためのツールとして評価している。災害対応において実際にどのような課題・リスクが発生しうるのかを的確に予測することは上述のとおり困難である。しかし、非常時に想定外な事態が発生することを回避するためにも、潜在的な課題・リスクを可能な限り抽出しておくことには一定の理がある。そのため、本研究で構築するシミュレーション、及びプラットフォームでは、災害対応に関する問題点を発見するためのツールとしての扱いに限定し、完全な予測を提供するものではないという立ち位置をここで明記しておく。

2.1.2 シミュレーションのレイヤー構造

住民の避難行動や浸水域での救助活動をシミュレーション上で表現するには人行動を物理的に記述したプログラムだけでなく、それを実行する空間である市街地のデジタルマップ（シミュレーション環境）が必要となる。また、実際の避難行動・救助活動では、道路状況や避難場所の位置等のマップ情報だけでなく、全体の災害状況を考慮した意思決定を行なっていると考えられる。そうした災害対応に関する活動モデルを記述するには、災害状況が時間経過で変化することや、それにより市街地のマップにも影響を与えているという事態にも配慮が必要だろう。さらに本研究では、住民の避難行動と浸水域での救助活動という二つの活動の連続性を考慮したシミュレーションを構築することになる。この二つの活動間の遷移を表現するためには、複数の人行動シミュレーションをつなげることになる。加えて、複数の活動フェーズを通して浸水状況も変化することになるため、自然災害シミュレーションによる災害状況の変動をシミュレーション間で共有しなければいけない。将来的には、その他の災害対応モデルを統合していくことを考慮し、シミュレーション技術のスケラビリティにも配慮する必要があるだろう。こうした要件・性能をクリアするうえで、本研究で開発・利用するシミュレーション構造を説明していく（Fig.2-1）。

本研究で扱うような避難行動や救助活動をモデル化するには、まず各活動を実行する人間の行動について記述する必要がある。ここでの「行動」は、特定の目的を抱き（意思決定）、それを実行する（動作）ことで具現化されるものである。住民の避難行動で例えると、まず避難すべきかどうか、どこに避難すべきか等の行動の方向性やゴールを判断し、具体的な手段（車や徒歩、自転車等）を伴って「移動」という物理表現で記述することが可能であ

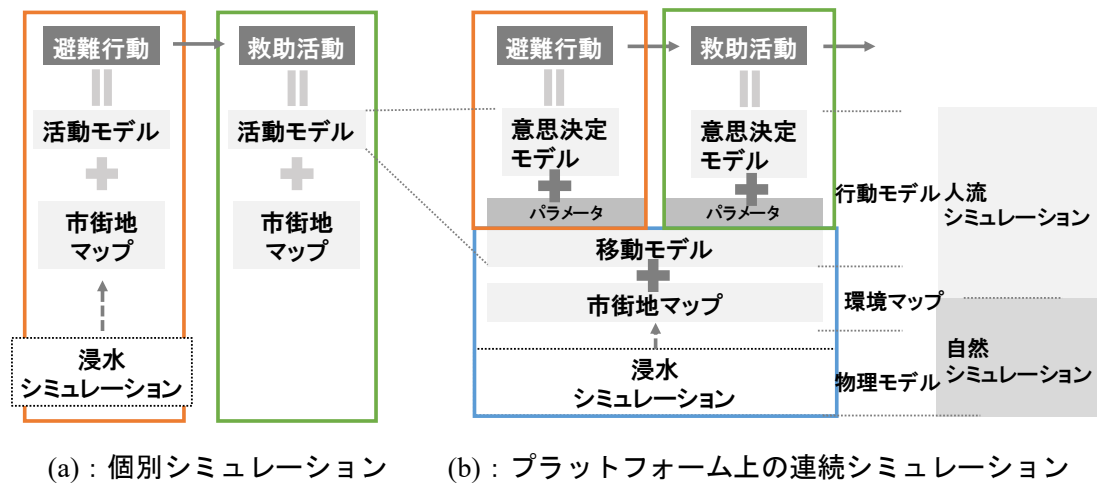


Fig.2-1 プラットフォーム内のシミュレーションレイヤー構造

る。これらの要素については、各災害対応活動の特性を踏まえて、行動原理やパラメータを設定していくこととなる。特に、特定の災害対応を実現した行動記述方法を**活動モデル**と呼ぶことにする。

より現実的な行動原理を表現するには、人行動が生じる市街地の構造を考慮する必要がある。これは、現実世界では限定された地理空間の内ではしか人は行動できないことによる。例えば、徒歩や車両移動であれば、道路や歩道上を動くことが基本であり、また交差点で移動方向を変えることや、一時的に停止するといった行動をとる。これらの人間らしい振る舞いを表現するには、シミュレーション空間内を自由に移動できるモデル表現ではなく、道路や交差点等の市街地形状によって行動空間に制限をかけられた行動モデルを表現することが求められる。そうした行動モデルを記述するには、市街地に関する情報である**環境マップ**も事前に作成しておく必要がある。

活動モデルと環境マップを含めて、人流シミュレーションでの基本的な人の活動を記述することが可能となる。しかし、このままでは災害状況の変化をシミュレーション内で扱うことができない。人が避難や救助の具体的な行動目的を形成する際には、地域内の災害状況が大きな意思決定要因となっている。たとえ道路形状に沿って移動するという行動モデリングを記述したとしても、道路が閉塞状態や浸水状態であれば徒歩・車での移動がそもそも実現不可能となってしまう。また時間経過により道路の状態が変化するという環境の変化も現実には起きうる。こうした災害の発生に伴う市街地内の動的な環境変化についても、人流シミュレーションでは考慮しなければいけない。

人行動の環境マップにこうした動的な性質を付与するためには、環境マップの表現方法に工夫が必要となる。そこで環境マップを **1)静的な要素**と **2)動的な要素**のふたつに分解して記述することとなる (Fig.2-2)。1)静的な要素では、道路形状や接続関係、交差点位置といった災害が発生する前から市街地が形成している構造のことである。それに対し、2)動的な要素とは、道路や交差点等の市街地の静的な要素が保有するパラメータのことを示していると考えて良い。このパラメーターには、例えば道路の閉塞状態の有無や混雑度合いといったラベルを付与することができる。市街地環境の動的な変化を記述するには、自然災害シミュレーションからの出力結果が、主に動的な要素である各パラメーターを変動させることによって、人行動からの環境の知覚状態が変動するという構図にすることとなる。こうした自然災害シミュレーションをも踏まえることで、災害状況の変化によって人行動の内容を切り替えるという処理も実現することができる。

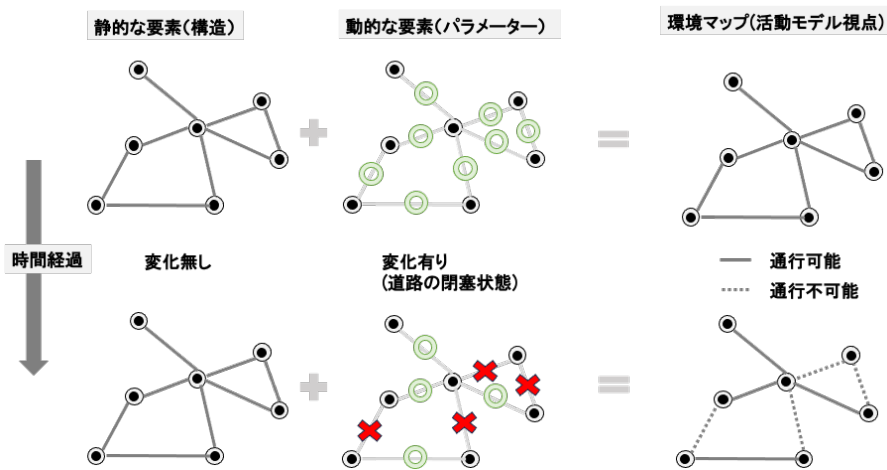


Fig.2-2 環境マップの静的な要素と動的な要素

もちろん対象とする災害現象や災害対応の種類によっては、自然災害シミュレーションを必ずしも考慮せずとも人流シミュレーションだけで事が足りる場合もある。例えば、市街地が浸水しており、活動を終えるまで浸水状況が変動しないという前提で救助活動を表現するとするならば、浸水域内の市街地構造を静的な状態として直接扱っても差し支えなく、あえて浸水シミュレーションによって時刻歴の浸水状況を計算しなくとも済む。

2.1.3 シミュレーション間の連携

前節では、地理空間情報ベースの災害対応シミュレーションを構築する上で必要なシミュレーションの各要素レイヤーについて説明した。本節では、それらのレイヤーの連携方法と、それにより実現される災害対応シミュレーションの計算処理を説明する。

Fig.2-3 に、本研究で構築する住民の避難行動・救助シミュレーション内の各レイヤーの連携的処理手順の概略図を示す。前節では、市街地等の環境マップを静的・動的要素の二つに分割し、自然災害シミュレーションからの影響を主に動的要素に反映させることで、災害状況の変化を記述しようとした。そして、人流シミュレーションでは、この環境マップという行動空間に基づいて人行動を再現しようとするものであった。その際に人行動の意思決定モデルで、災害状況の変化を考慮するには、この環境マップそのもの変化について着目すればいいことになる。

道路形状・接続関係/ 浸水深さメッシュ

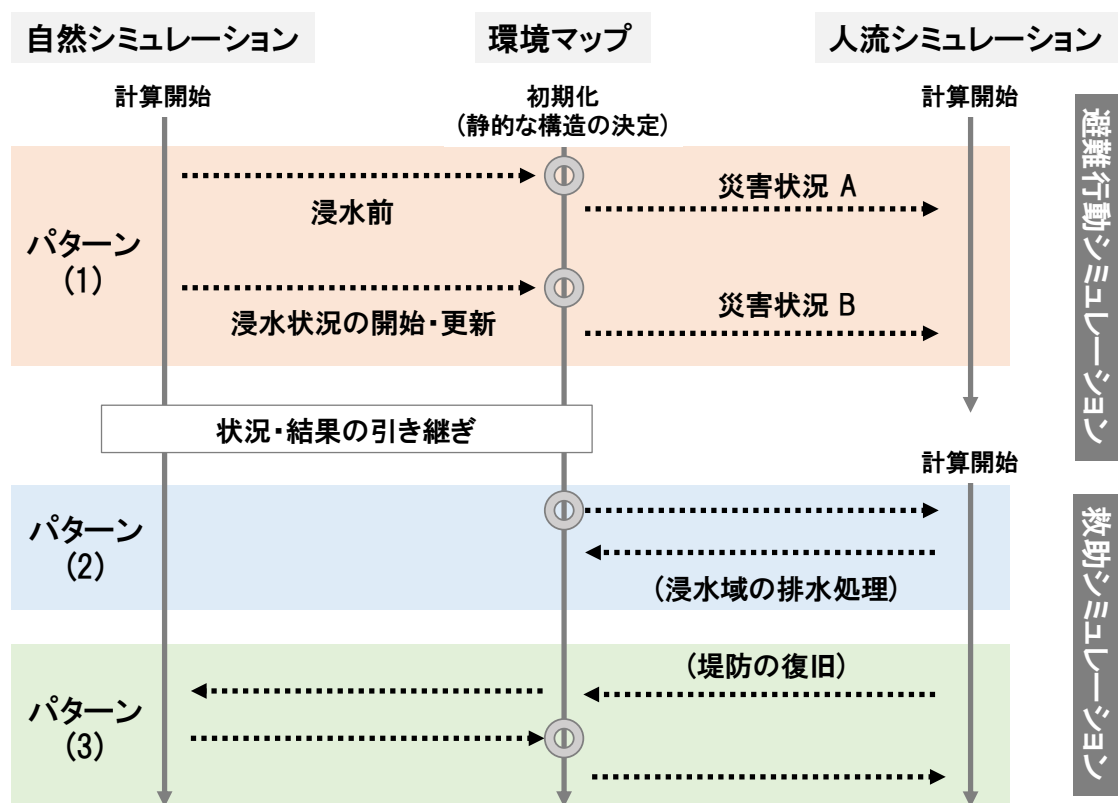


Fig.2-3 災害対応シミュレーションの各レイヤーの情報伝達構造

これらの二つの要点を重ねると、自然災害シミュレーションが引き起こす災害状況の変化の影響は、環境マップを変化させるという処理を通じて、人流シミュレーションへと伝播することとなる。つまりは、災害状況から人行動の意思決定モデルへの影響を記述する上で、自然災害シミュレーションから人流シミュレーションへの直接的な情報の伝達が行われず、どちらのシミュレーションでも参照されている環境マップという共有資源を通じて、間接的に影響を与えている (Fig.2-3 内のパターン(1))。

この情報伝達構造について、本研究が扱う洪水発生時の住民の避難行動シミュレーショ

ンに沿って説明すると、まず環境マップとして市街地内の浸水深さのメッシュデータを記録する。このデータは、市街地をある均等のメッシュで分割し、各メッシュ内の浸水深さの値を格納しており、洪水が発生する前ではどのメッシュも浸水深さは0.0[m]である。住民の避難行動では、この浸水深さの情報を参照しながら移動経路等を判断することとなる。そして、洪水氾濫シミュレーション内での計算が進行し、計算上市街地内への洪水が発生すると、この浸水深さのメッシュデータが更新される。そして、避難行動シミュレーションでは、更新後の浸水深さの情報に基づいて、避難経路の判断や被災の有無を判定する。

住民の避難行動のように、災害状況から一方的な影響を受けるだけの災害対応活動では、Fig.2-3 内のパターン(1)のような情報伝達構造をシステム上で形成していく。その後、救助シミュレーションへと災害対応フェーズが転換した場合には、人流シミュレーションは切り替えていく。その際に、自然災害シミュレーションや環境マップ等の外部要因に関しては、その結果や状況を引き継ぐことで、時間経過で変化した災害状況や前フェーズでの災害対応活動の影響を後続へと伝播していくことができる。

情報伝達構造の別方式としては、救助戦略の一環として排水処理の実施することで、環境マップ上の浸水状況が改善されるという影響関係(Fig.2-3 内のパターン(2))や、堤防等のハード面での復旧により洪水氾濫の影響を緩和するという自然現象側への災害対応の対応策の実行もありうる(Fig.2-3 内のパターン(3))。どのパターンであれ、自然・人流シミュレーションの出力結果は、一度環境マップに反映され、その後お互いのシミュレーションへの入力になっているという連携方式である。こうしたレイヤー連携方式のメリットは、各シミュレーション間の依存関係が緩和され、シミュレーション技術の代替性・可変性を高めることができるという点である。これまで自然災害シミュレーションは数多く開発されており、扱う災害の種類や規模、予測精度や計算速度等のさまざまな側面でシミュレーション技術を使い分ける必要がある。災害対応シミュレーションにおいては、これらの自然災害シミュレーションの活用が欠かせないが、シミュレーションの選択に大きな制約をかけずに済むというシステム構造は、将来的な自然災害シミュレーションの進歩や拡張、選択への柔軟な対応を実現させることとなる。このように場面に応じた自然災害シミュレーションの利活用にも適用できる工夫をしている。

もちろんこのレイヤー連携構造において、環境マップの表現方法が大きな障害となりうる。可変性・拡張性の高い災害対応シミュレーションを構築する上で、どのような自然災害・人流シミュレーションからもアクセスできるデータ形式を内包する環境マップを設計しなければならない。また、自然災害・人流シミュレーション間の情報伝達に齟齬を生じさせないように配慮が必要である。しかしそれほどの柔軟性・汎用性の高い環境マップを

あらゆる災害に対応できるデータ構造を表現することは一般的に困難であるといえる。

幸いなことに、洪水氾濫シミュレーションでは、その多くの既往予測技術で浸水深さメッシュデータ、あるいはそれに類似したデータを結果として出力することが可能である。そのため自然災害シミュレーションからの視点では、環境マップのデータ様式への要求は厳しいものではない。そして、人流シミュレーションには現状況用的な技術方式が存在していないため、人流シミュレーションを動かすための環境マップのデータ様式を新規に規定することも可能である。その際には、洪水氾濫シミュレーションからの浸水深さメッシュデータを参照した人行動モデリングを構築することで、自然災害シミュレーションとの整合性を損なわないレイヤー連携構造を形成できる。

その他の環境マップ上の道路形状や接続関係といった人移動空間の表現方法については、人行動モデリングの特徴に沿って選択していかなければいけない。そこで次節では、本研究で使用する人行動モデリングを説明し、そのモデルに適した環境マップのデータ様式や環境構築の準備へと進めていく。

2.2 活動モデリングと環境構築

ここでは住民の避難行動シミュレーション及び救助シミュレーションの実行に必要な市街地構造の環境マップの表現方法について説明する。そのため、まず各活動モデルの記述形式を整理し、次にそのモデルを稼働させる上で十分な地理表現を提供できる環境表現を選択する。

2.2.1 人流モデルの整理

人流シミュレーションの構築においては、市街地形状等の人行動における環境側からの物理的制約を考慮しなければいけない。そのためにも、まず人行動の表現方法を規定してから環境側の表現形式についての仕様を明確、あるいは指定する必要がある。実際、人流シミュレーションではいくつかの表現方法で人の挙動が記述されており、それぞれプログラムの実装方法やシミュレーションフロー、シミュレーションへのデータ入力・結果出力内容が異なっている。同時に、行動モデリングの違いから、シミュレーションを実行するために必要な市街地環境のモデリング方法や、その要素である地理空間データに対する要求精度にも違いが発生する。そうした背景から、本節ではまず人流シミュレーションにおける行動モデリングの種類について整理し、各モデリング形式の特徴や環境側が提示すべきデータ内容について説明することとする。

本研究で述べる災害対応における「移動」とは、「人や車といった移動主体が、ある目的地(特定の避難所や建物, 計算領域外への脱出点)に到達することを目的とした行動であり, その途中で交差点での停止や方向展開, 建物への一時的な滞在等のプロセスを含めている」ものとする. この移動モデルを表現する上では, 移動主体や交差点・建物といった地理空間上の各種の位置情報(x座標, y座標)のデータが最低限必要である. これを起点に, 市街地内を移動するという観点から, より精密な行動モデルを記述するには, 市街地形状の表現方法もより詳細に再現していくこととなる. そういった観点から, 人流シミュレーションにおける主な環境モデリングの形式を Table.2-1 にまとめた.

Table.2-1 人流シミュレーションにおける環境側のモデリング方法の整理

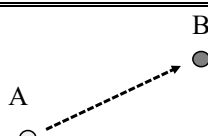
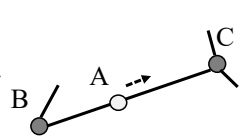
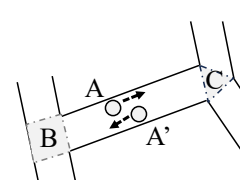
モデル名	イメージ図	環境側のデータ形式	特徴
数式モデル		・移動主体(A)と目的地(B)の位置情報	<ul style="list-style-type: none"> ・簡易的な計算式で人移動にかかる時間を計算できる ・防災計画上での避難時間や救助時間の算定で使われる
ネットワークモデル		・各交差点(B,C)のノード位置とリンク情報	<ul style="list-style-type: none"> ・市街地形状を簡易的に表現したモデル ・リンクに重みを持たせることで, 道路容量のキャパシティを表現できるため, 渋滞等の混雑状況も表現可能 ・ネットワーク構造であるため, 最適化理論の適用も可能
形状再現モデル		<ul style="list-style-type: none"> ・各交差点(B,C)のノード位置とリンク情報 ・幅のある道路や交差点の形状データ ・道路や交差点の識別ID ・道路の角度情報 	<ul style="list-style-type: none"> ・実際の市街地形状を再現したモデル ・人/車同士の衝突回避等のコミュニケーション表現に自由度が高い ・表現力が高い分, データの用意や計算コストが高い

Table.2-1 にまとめる上で, 既往の住民避難シミュレーションや救助シミュレーションを用いた研究を俯瞰し, それらに共通するモデリング方式を大別している. ただし, それらの既往研究内で実際にどのような環境モデリングを行っているのかを明記していることは稀である. そのため, これらはいくまでも著者の視点で整理していることに注意が必要である. また, 大別後のモデル名についても世間的に普及している自明な名称が見当たらなかったため, モデルの判別性に配慮し著者が独自に暫定的な名称を与えている.

さて Table.2-1 によれば, 人流シミュレーションを動かす上で市街地の環境モデリングの方式には, 1)数式モデル, 2)ネットワークモデル, 3)形状再現モデル, の3つがあるといえる. まず, 1)数式モデルは, 人や車といった移動主体と目的地の相対的な位置関係から, 目的地に至るまでの移動時間を算出する方法である. シミュレーションを行う上で用意しなければいけないデータが, 移動主体と目的地の位置情報だけであるため, データ準備のコストが少なく, また計算方法も単純であるため計算コストも低く, 簡易的な手続きで移動時間

を算出することができる。しかし、簡易的な算定式であるが故に、市街地の形状や他の移動主体との相互作用を考慮していないため、移動時間そのものを過小に評価してしまう可能性もある。そのため、住民の避難時間や救助時間の概算のためのモデル方式であり、主に防災計画等に使用されるケースが多い。

次に、2)ネットワークモデルは、数式モデルでは扱えなかった市街地形状を簡易的に表現したものである。人や車等の移動主体は市街地内の道路や歩道を経由して目的地へと向かうはずである。そのため、市街地内に存在する複数の道路等の接続関係を記述し、道路等に沿った移動を再現しようと試みる表現形式といえる。このモデルに特徴的なのは、各道路(リンク)とそれらが接続する交差点(ノード)といったネットワーク構造が内包されていることである。これにより、移動主体は複数の交差点を経由することで、道路上を移動しながら目的地へと向かうことができる。このリンクの重みには、リンクが接続している2点のノード(交差点)間の距離を適用することで、ノード間の移動時間を計算することができる。また、ネットワーク構造という表現形式から、ノード間の最短経路の計算といった各種最適化理論の導入も可能になっている。さらに、リンクの重みとして、各リンク内に存在する移動主体の数やリンクの容量上限等の追加情報を取り入れることで、リンク内の人口密度を計算でき、渋滞の発生やそれによる移動主体の移動速度の低減等のよりリアルな物理現象の記述も可能となっている。注意点として、道路長さの計算において、交差点同士の直線距離を採用すると、迂回形状の道路においては道路長さの算出が過小になる恐れがある。

最後に、3)形状再現モデルは、ネットワークモデルよりもさらに市街地形状を忠実に再現した表現形式である。道路や交差点を、線や点といった形式ではなく、幅や面積をもつ幾何学的な形状として表現していることが特徴的である。ネットワークモデルと同様、移動主体は交差点を経由しながら、道路や歩道に沿って目的地へと向かうこととなる。しかし、道路や交差点に広がりのある表現方式を導入したことで、市街地内での移動主体同士のコミュニケーションをより高い表現力でモデリングすることが可能となる。モデル表現の幅が広がった分、他のモデリング形式よりもデータ準備や計算コストが高くなっている点には注意が必要である。

さて災害対応活動を表現する際に、住民や活動部隊の挙動を個別に記述するというマイクロなモデリングを採用することで、災害対応の動態をより柔軟かつ詳細に把握することが可能であろう。そこで本研究では災害対応に関わる各ステークホルダーの挙動をマルチエージェントシステムとして表現することとする。マルチエージェントシステムでは移動主体の意思決定や能力を個別に設定することが可能であり、社会現象を記述する上でとても表現能力が高いモデリング方法である。今後デジタルツインプラットフォームとして地理

空間情報ベースのシミュレーション技術を構築する上で、より高度かつ詳細な行動モデリングを表現する上で有用な技術であると考えられる。同時に、そうしたマルチエージェントシステムを支える地理空間表現として、市街地形状をより忠実に再現した形状再現モデルとの相性が良いと判断できる。実際、形状再現モデルであれば、特定の制約を加えることで、ネットワークモデルでの計算結果との整合性を保てる。そのため、将来的なシミュレーション運営や分析基盤の構築を想定し、本研究では、環境モデルとして最大限の表現能力をもつ形状再現モデルを採用する。

2.2.2 市街地の形状再現モデル

道路や交差点等の市街地の構成要素を形状再現モデルで表現した場合、マルチエージェントシステムによる人流モデルは、道路や交差点上を移動するという計算処理を実装していくこととなる。その場合には、道路上又は交差点に到達した人エージェントの次の移動方向を、エージェント自身へと情報を送信しなければいけない。ノード間を直線形状のリンク(道路)でつなげたネットワークモデルと異なり、交差点間の位置関係から直接的に移動角度を算出することは難しい。例えば、二つの交差点が迂曲した道路によって接続されている場合、交差点間の位置座標から計算されたベクトル方向にエージェントを動かすと、道路外に飛び出すという想定外の結果を招きかねない。そうした背景から、エージェントの移動空間に大幅な自由度がある形状再現モデルにおいては、エージェントを目的地に向けてどの方向に動かしていくのかという動作上の課題を解決しなければいけない。

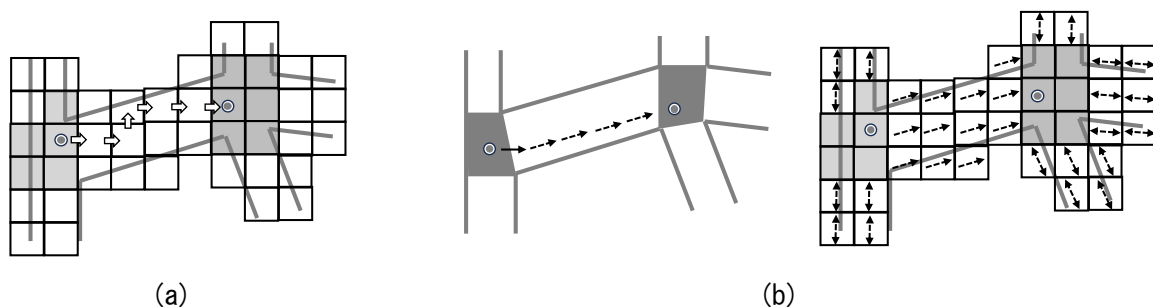


Fig.2-4 形状再現モデルにおける移動表現

この点について、大きくふたつの方法で解決することが可能である(Fig.2-4)。一つ目は、Fig.2-4(a)に示すように、シミュレーションの計算領域を多数の均等グリッドで分割し、隣接するグリッドへと人エージェントを渡り歩かせることで、目的地へと移動させるセルベース型[1]の移動空間を導入することである。この方法では、道路や交差点を覆うように均等サイズのグリッドを生成し、そのグリッドの重心をノードと見立て、隣接するグリッド同士に接続関係を持たせた巨大なネットワーク構造を持たせている。前節で述べた交差点間のネットワークモデルよりも、さらに細かいネットワーク構造を構築することで、道路

や交差点の形状を考慮したエージェントの移動モデルを構築することを可能にしている。人エージェントの移動空間がグリッド内に限定されているため、シミュレーションが予想外の挙動をおこす恐れが少なく、安定した計算を実行できることも利点である。この空間表現では、津波避難時における自動車避難の最適化[2]、歩車混合での避難計画[3]で使用例があげられる。他方、屋内避難での利用例もあり、地震や火災時の避難計画にも使用されている[4,5]。しかし、巨大なネットワーク構造を構築し、それに基づいてエージェントの移動方向を決定させるという処理はとても計算コストが高くなる。巨大な市街地を対象とした計算領域では、特に徒歩表現に必要な細い道路にまでを考慮した場合には実行時間が大きな課題になりうると考えられる。

二つ目は、Fig.2-4(b)に示すように、エージェントの移動空間をグリッドで区切ることなく、道路形状に沿った移動をさせるという方法である。この方法では、エージェントは道路の傾きと同じ方向に移動することとなるため、より自然な移動モデルを構築できる。その原理は、Fig.2-4(b)に示すような、道路角度を記録したグリッド領域から構成されるベクトルマップを作成することで、エージェントの移動方向をマップから検索できる工夫がされている。セルベース型の移動空間と比較すると、均等グリッドをシミュレーション計算領域全体に展開する点は同じであるが、グリッド自体に接続情報を持たせず、道路角度という値だけをもたせているという違いがある。人エージェントは、自身の現在位置からベクトルマップ上で対応するグリッドが保有する道路角度を参照し、次にどの方向（角度）に移動するかを決定する。エージェントを動かすための手続きにおいて、膨大なネットワーク構造を探索するのではなく、ベクトルマップの二次元配列の検索だけで済むため、計算コストがとても低い。そのため巨大な計算領域(市街地)におけるシミュレーションにおいて、計算時間の大幅短縮を実現しつつ、エージェントの自然な移動モデルを表現できるという利点を備える。

こうしたふたつの方法の違いを踏まえ、本研究では後者のベクトルマップ型の移動空間モデルを採用する。この方式では、過去に畑山ら[6]が採用した道路表現をベースにし、構築することを目指す。今後災害対応シミュレーションをプラットフォームとして普及するという将来を見据え、より広大な計算領域でも稼働するモデル表現を実現するため、ベクトルマップ型の移動空間を中心とした人流シミュレーションの環境構築を目指す。

2.2.3 ベクトルマップの作成

前節では、人エージェントのより滑らかな移動を実現するため、移動方向を記した道路や交差点の識別表現を含んだベクトルマップを計算領域上で構築することを目指した。具体的な作成手順については次節に述べるとし、まず本節では、このベクトルマップの作

成過程における成果物について説明する。

ベクトルマップでは道路の傾斜角をグリッド上に記録させているが、この道路の傾斜角の算出は決して容易ではない。例えば、二つの交差点間の相対方向角を道路傾斜角と見做した場合、迂曲した道路の傾斜度合いを正確に算出することができなくなる。また、ひとつの道路でも、常に同じ傾斜角であるとは限らない。そうした課題を克服するには、道路をそのままのサイズで扱うのではなく、より細かい範囲で区切り、道路の傾斜角をより小さなスパンごとに算出する必要がある。

その具体的な方法として、Fig.2-5のように、道路領域をいくつかの三角形に分割し、三角形それぞれに道路傾斜角を保有させることができる。この三角形領域を生成することができれば、各三角形の底辺(道路縁側)を構成する三角形の頂点座標から、この底辺の傾斜角を算出することができる(Fig.2-5(a))。算出された傾斜角は、この三角形領域においては、道路縁の角度、つまりは道路の傾斜角であるとみなすことができる。これを踏まえると、大きな道路空間を同様に三角形に分割し、それぞれの領域で道路傾斜角を算出すれば、たとえ迂曲している道路であっても、その道路形状を忠実に再現したベクトルマップを作成することができる。

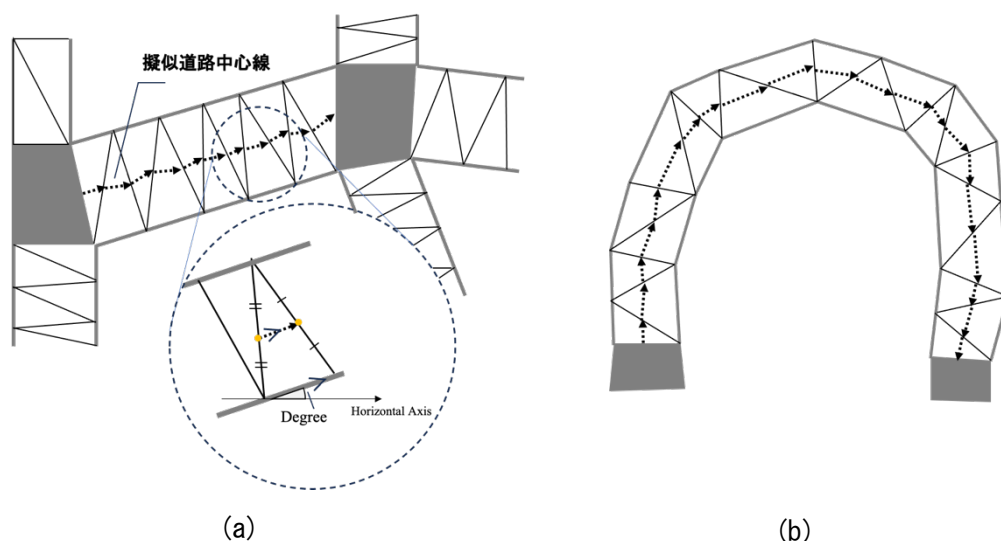


Fig.2-5 ベクトルマップの作成目標

さらに、各三角形の底辺以外の辺の中点を結び、それらをつなぎ合わせることで、道路の擬似的な中心線を作成することができる。中点間の線分は、底辺と平行の関係にあり、それ故にやはり道路の傾斜角と同等である。そのため、この中点間の線分を、道路中心線であるとみなすこともできる。この手法を用いれば、Fig.2-5(b)のような湾曲した道路であっても、擬似的に道路中心線を作成することができる。これを用いれば、交差点間の道路長さの計

算も、道路形状に左右されることなく、比較的正確に算出することができる。もちろん、この三角形分割をより細かく行うことで、さらに正確な道路角度や距離を計算できるようになるが、その分計算コストが増大することに注意が必要である。

さて本項の説明により人エージェントを動かすためのベクトルマップの作成に必要なデータ処理の目標物が判明した。以降は畑山ら[6]の研究で示された避難シミュレーションのベースマップの作成方法を援用し、このベクトルマップの具体的な作成手順について述べる。畑山ら[6]が実施したシミュレーションでは、住民の避難移動の基盤となるマップ情報として、本研究が求める道路縁境界や移動経路・角度を道路属性に付与する表現方法を採用している。この研究では高知県黒潮町万行地区を計算領域とし、そのサイズは 500m 角程度の範囲となっている。昨今の水害被害を考慮すれば被害がより広範囲に及ぶことも考えられるため、シミュレーションで扱う計算領域も拡大させる必要があるだろう。そこで畑山ら[6]の表現方法を拡張し、大規模な計算領域でも構築可能なアルゴリズムを提案していく。また、全国で使用できるシミュレーション技術を開発するために、オープンデータからの作成手順を紹介していく。

2.3 シミュレーション環境の作成手順

ベクトルマップを作成するためには、エージェントの活動空間を三角形に分割するという幾何学的な処理が必要であった。さらに、この三角形分割を実施するためには、道路自体を複数の頂点をもつポリゴンデータとして表現する必要がある(2.3.1 参照、以下道路等ポリゴンと呼ぶ)。道路等ポリゴンデータの作成後は、各頂点に対し、三角形分割を行い、Fig.2-5 のような三角形網を道路内に作成する。その際に、道路等ポリゴンでは識別できていなかった道路と交差点を、別の領域として抽出する(2.3.2 参照)。切り出された道路・交差点から、道路ネットワークを作成することや、Fig.2-5 が示す道路傾斜角を計算し、ベクトルマップへとデータを転写していく。

これらの作業を進めるには、まず基礎となる道路データが必要となる。そこで、本研究では国土地理院が公開している基盤地図情報上の道路縁データをベースに、人流シミュレーションでのベクトルマップの作成方法を説明していく。基盤地図情報は、日本全国の道路情報を扱っていることから、以降で述べるベクトルマップの作成手順に従うことで、日本全国での人流シミュレーションの環境マップを作成することが可能である。将来的に、全国どこでも人流シミュレーションを実施できる環境を構築することを想定し、全国規模のデータが無料で公開されている国土地理院のデータを用いて説明を進めていく。

2.3.1 道路等ポリゴンの生成

基盤地図情報上のデータには道路等ポリゴンのデータがないため、まずは公開されてい

る道路縁のラインデータから、道路等ポリゴンデータの作成を試みる。

基盤地図情報上からデータをダウンロード後、道路縁データには道路の縁を示したラインデータが格納されている。その道路縁の各ラインデータには、複数の頂点を内包しており、それにより直線以外の道路形状を表現している。QGIS 等をはじめとする地理空間情報システム (Geographic Information System : GIS) では、ラインデータからポリゴンを作成する機能を備えているものも多い。その機能を活用して、オリジナルの道路縁データをポリゴン化するという試みが可能ではある。しかし、実際に作成されるのは、道路等ポリゴンではなく、道路縁で囲まれた敷地内ポリゴン (Fig.2-6(A)) である。これは、敷地境界を形成する道路縁同士を結ぶことは可能であるが、道路そのものの端部が開放されていることから、向かいにある道路縁同士を直接接続する術がなく、結果道路そのものを閉じたポリゴンを作成できないことが原因である。

そのため、道路を含めた計算領域全体を一度空間的に閉じることで、道路の端部に境界線を生成し、計算空間全体を一つの大きなポリゴンに変える (Fig.2-6(B))。これには、計算領域上の全ての頂点对し、凸包多角形の生成処理を実行することで実現できる。その後、巨大な多角形のポリゴン (B) から、敷地内ポリゴン (A) を切り抜くことで、道路等ポリゴンを取り出すことができる。

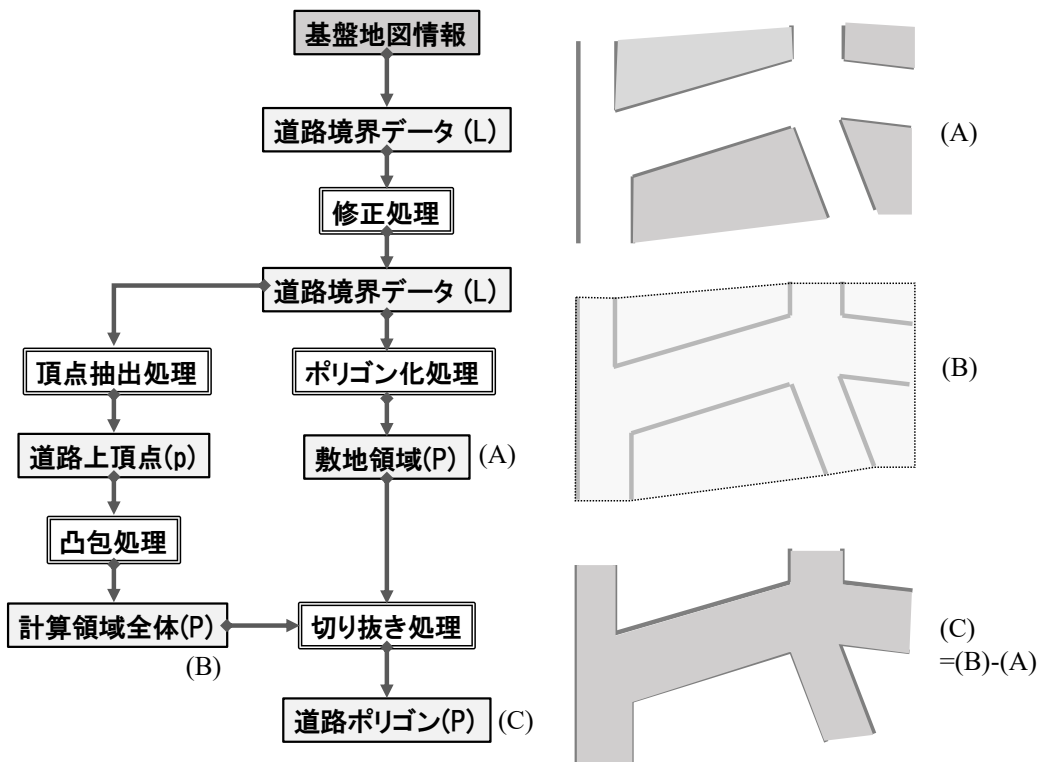


Fig.2-6 道路等ポリゴンの作成手順

2.3.2 道路・交差点の識別

道路等ポリゴンは、シミュレーションにおける人エージェントの活動空間そのものである。しかしこの状態のままでは、「交差点を曲がる」ことや、「目的地へ向けて方向転換」といった、経路選択の動作を実装するには情報量が不足している。経路選択においては、やはり交差点(ノード)を道路(リンク)で接続した道路ネットワーク構造を用意する方が便利である。そこで、道路等ポリゴンから、道路の領域と交差点の領域を区別し、それぞれを異なるポリゴンとして抽出していく。

まず、道路等ポリゴン全体で三角形分割を実施する。道路等ポリゴンでは、道路の縁に沿っていくつもの頂点を内包している。このポリゴンから全頂点を抽出し、ドロネー三角分割を適用することで、道路等を分割した三角形ポリゴンを作成することができる。その際に、頂点の数をポリゴンの境界線に沿って増加させておくことで、より細かい三角形分割を行うことも検討しておく。

この処理を通じて得られた三角形ポリゴンは、Fig.2-7(A)のように、計算領域全体を覆う規模となっており、エージェントの移動空間以外にも三角形ポリゴンが存在することになる。ここではエージェントの移動空間とそれ以外を明確に切り分けるために、必要のない三角形ポリゴンを削除する。例えば、三角形ポリゴン(Fig.2-7(A))を、道路等ポリゴン(Fig.2-7(C))によって切り抜くことで、道路等ポリゴン内に含まれる三角形ポリゴンだけを残すことができる。

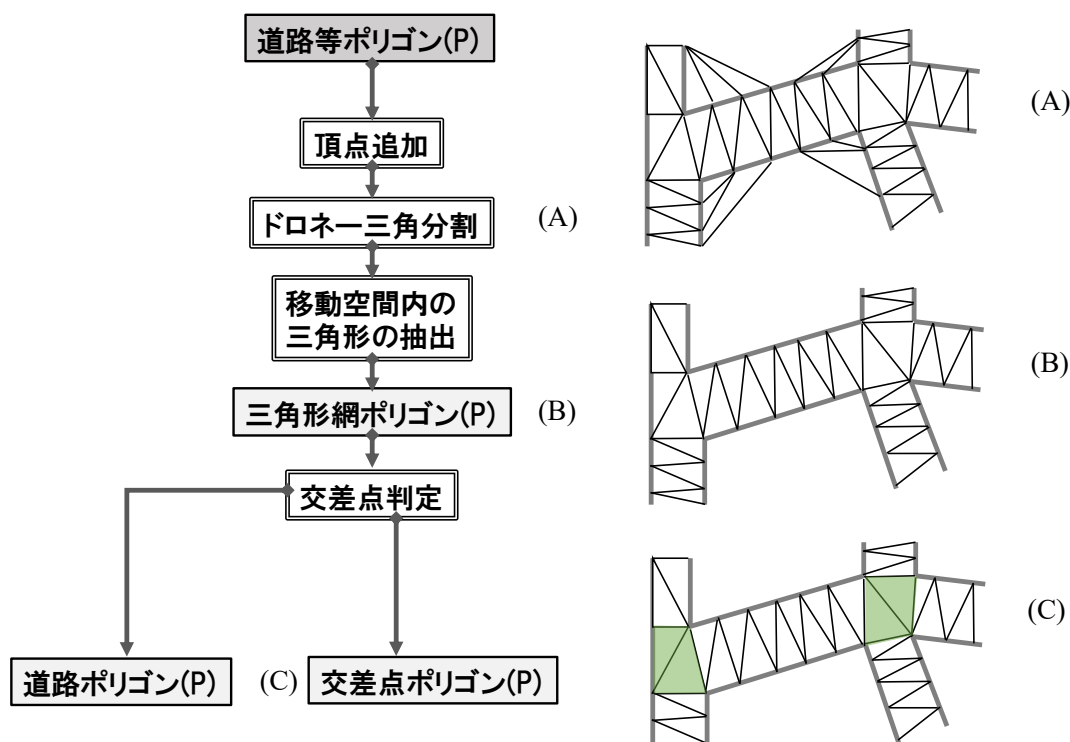


Fig.2-7 道路・交差点ポリゴンの作成手順

(Fig.2-7(B)).

必要な三角形ポリゴンを抽出した後は、このポリゴンデータに基づいて道路と交差点を区別していく。この識別処理では、各三角形ポリゴンがもつ3つの頂点の関係性から道路と交差点のどちらを構成するポリゴンであるかを判断する。基本的に、交差点そのものを判定することは難しいため、道路であるかどうかを判定するアルゴリズムを実装し、道路ではないものを交差点であると判別するほうが便利である。

交差点判定処理には大きく二つのプロセスを経る。

(a) 道路内のポリゴンを抽出：

まず、道路であるかどうかを三角形ポリゴンから判断する。前述のとおり、この判定には各三角形ポリゴンの頂点データを活用する。三角形を形成する各頂点は、元は道路縁ポリゴンのデータであり、道路縁(敷地境界)ごとに特有の ID とその中の頂点 ID が連続して割り振られている。その性質を活用し、「同じ道路縁 ID であり、頂点 ID がひとつ違いである 2 つの頂点を端にもつ辺が存在する三角形は、道路縁に沿って形成された道路ポリゴン内の三角形」と判定する(Fig.2-8(a)).

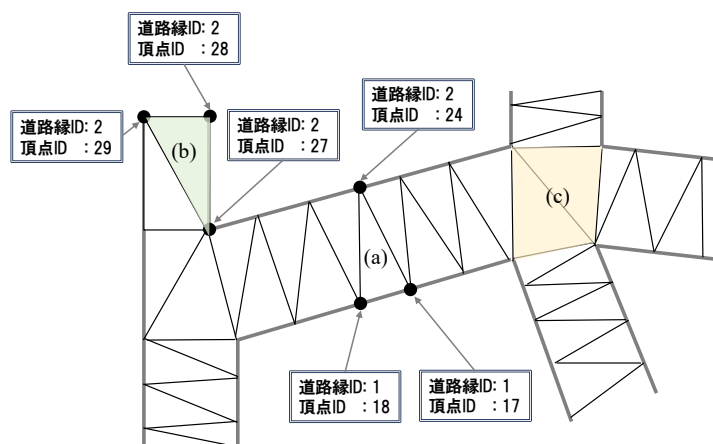


Fig.2-8 交差点の判定プログラムの概要

(b) 袋小路の端部の判定：

(a)の処理により、厳密には交差点と道路を識別することは可能である。しかし、この処理では、袋小路にある三角形も道路であるとみなされてしまう。実際に、道路の端部にあるポリゴンは“交差点”ではないものの、“道路”であるとして扱うことで、道路ネットワークを構成するうえでは、この端部を接続する術がなくなってしまう。そこで、道路端部のポリゴンも、“交差点”であると判定することで、道路の端部にまで道路ネットワークを形成できるようにする。この道路端部の判定には、「同じ道路縁 ID であり、全ての頂点で、ID がひとつ違いである三角形」を探すこととなる(Fig.2-8(b)).

これらの処理により、道路等ポリゴンから、道路ポリゴンと交差点ポリゴンを形成する三角形を判別することができる。また、ひとつの交差点の中に、複数の交差点判定がなされた三角形が含まれている場合、それらを結合することで、多角形状の交差点に置き換える。

2.3.3 道路ネットワーク及びベクトルマップの作成

ここまでで、道路ネットワーク及び道路角度を算出するための準備が整った。最後に、交差点同士を道路で結合する処理や、三角形ポリゴンから道路傾斜角度を算出する処理を施していく (Fig.2-9)。

(a) 道路ネットワークの作成：

道路ネットワークには、交差点同士の接続関係やそのリンクの重み（移動距離）が記述されていなければいけない、そのため、ある交差点が、どの交差点とつながっているのかを判断する処理が必要となる。ここでは、道路ポリゴン内の擬似道路中心線 (Fig.2-5(a)) を活用し、交差点間の接続関係の有無を判定していく。

まず、作成した交差点ごとに、重心と交差点周辺の中点を抽出し、道路等ポリゴン上に内包（境界上波除外）されているものを残す。次に、各交差点の重心から、交差点周辺の中点のひとつに向かって線を引く。その交差点の中点から、今度は道路内の三角形ポリゴンの中点のうち、最も近い点へと線を引く。その後は、道路ポリゴン内の擬似道路中心線をたどり、もう片方の交差点の中点や重心へと到達させる。その際に、各線分距離を加算することで、交差点間の距離も計算しておく。

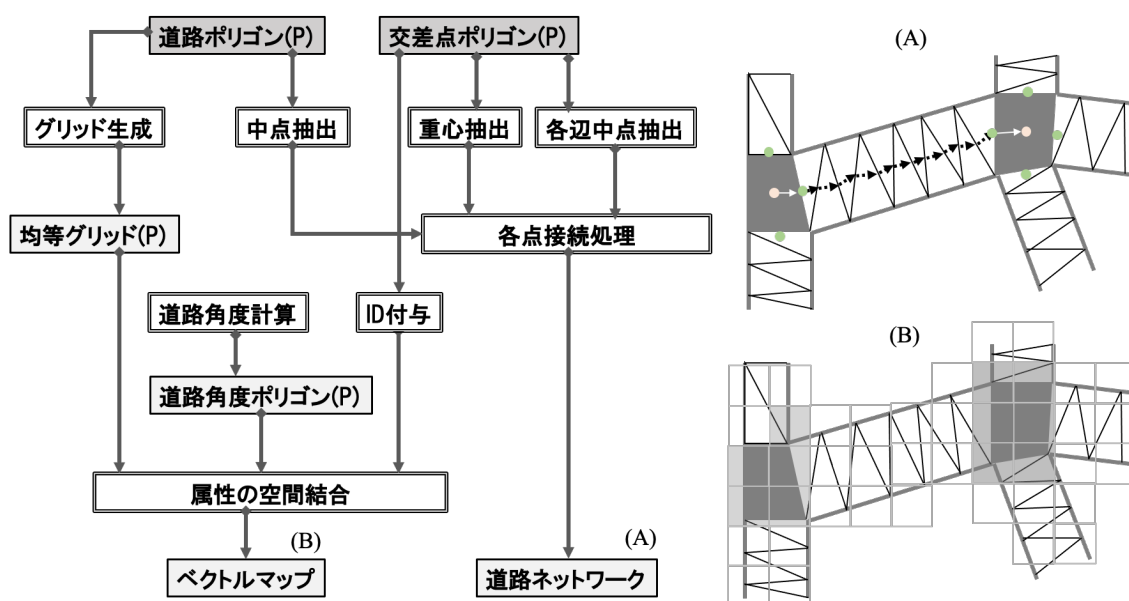


Fig.2-9 道路ネットワーク及びベクトルマップの作成手順

仮に、一つの交差点から探索を開始し、また別の交差点へと到達できた場合には、この二点の交差点は接続関係にあるものとして、リンクを形成する。逆に、別の交差点を発見できなかった場合は、その探索方向にはリンクが存在しないものとして判断する。形成された道路ネットワークのうち、リンクの重みとして、先に計算していた交差点間距離を与えることで、道路長さを考慮した重み付きネットワーク構造を作成できる。

(b) ベクトルマップの作成：

ベクトルマップには、人エージェントが移動方向を決定するための道路角度を記録しているが、それ以外にも交差点ラベルを記録することで、エージェントが交差点に到達しているかを判断できるようにし、経路選択処理を実装できるように工夫する。

このとき、交差点 ID に対し、正負を逆にして記録することで、道路角度をマッピングしたベクトルマップから、交差点を識別することを可能とする。他方で、道路角度の算出においても、正の値(0度-359度)に限定されるよう調整する。

二つの値をもつ道路ポリゴン・交差点ポリゴンに対し、計算領域全体に展開したグリッドポリゴンへと値を参照させることで、ベクトルマップを作成することができる。このとき、エージェントの移動空間以外のベクトルマップ上のグリッドには、活動範囲外を示す値(例えば、361)を記録しておくことで、エージェントの場外処理が行えるようになる。この作成されたベクトルマップは、データ上では二次元配列で表現できるため、人エージェントの移動方向や経路探索におけるデータ参照が比較的高速に行うことができる。

以上により、人行動モデリングにおいて重要な「移動処理」を支える環境マップの作成手順を説明した。以降は、本研究で水害発生を想定する対象市街地について説明するとともに、環境側の要素として、洪水・氾濫シミュレーションの設定シナリオについても触れていく。

2.4 江東デルタ地帯

今回対象とした市街地は、江東デルタ地帯と呼ばれる地域である。日本の東京 23 区にあるこの地域の地理特性として、海拔ゼロメートル以下のエリアに広域な市街地を築いており、地域の東西を流れる荒川や隅田川からの洪水氾濫の被害が全域に広がるリスクが高いことが挙げられる。特にゼロメートル地帯とも呼ばれる当該地域では、浸水深さが 5m にも達すると予測されている。また、下水道から排水処理が難しく、過去のカスリーン台風時には、20 日間という長い浸水期間となった過去がある。内閣府中央防災会議の調査会では、洪水時に最大 73 万人ほどの孤立者が出ると想定[7]されている。例えば、過去に堤防の崩壊と長期の浸水時間及び大規模な孤立住民を発生させた昭和 22 年のカスリーン台風時と同規模の洪水の

発生時を見込んだ場合、当該地域でも相当数の住民の逃げ遅れの発生が予想されている[8].

江東デルタ地帯は、具体的には東京 23 区のうち、墨田区と江東区、そして江戸川区の一部によって形成される地域である。そして、江東デルタ地帯以外にも、豪雨によって荒川が氾濫することによる大規模洪水の発生リスクがある地域には足立区や葛飾区も含まれている。これら 5 区(墨田区、江東区、江戸川区、足立区、葛飾区)では、大規模水害時におけるハザードマップを共同で作成し公開している (Fig.2-10)。 Fig.2-10 でわかるように、大規模水害発生時には、荒川を中心に、大規模な浸水状態が発生する恐れがある地域が広がっている。浸水深さも深刻なレベルになりうるため、洪水氾濫への避難が必要になった場合には、当該地域に留まるのではなく、浸水想定地域外に避難することを呼びかけていることが印象的である。

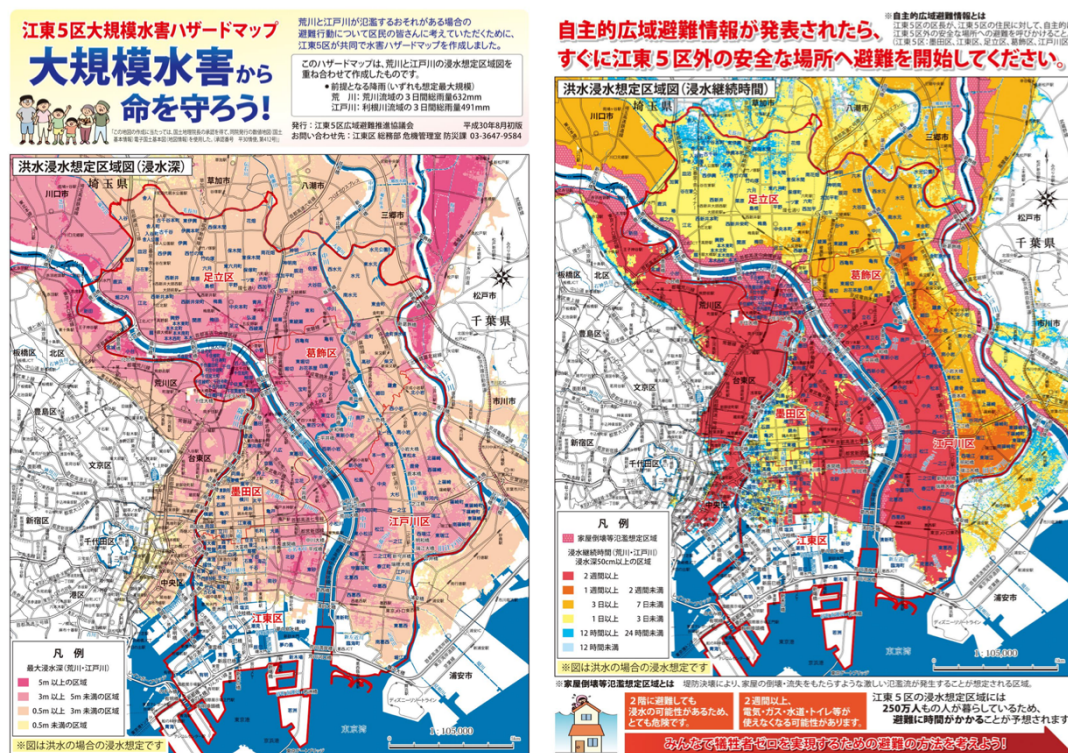


Fig.2-10 江東 5 区 大規模水害ハザードマップ (出典 : [9])

また、浸水を原因とする電気・ガス・水道・通信などのライフラインの被害が発生することも想定される。それぞれ電気については電力供給の途絶に加えて、建物の電源設備自体の浸水による停電が発生したり、また漏電による二次災害が想定される場合に安全を考慮してあえて電力供給を停止したりする等の事態が考えられる。ガスに関しては、都市ガス供給用設備はその構造上の性質から浸水や停電の影響を受けない。しかし、家屋倒壊等が懸念される地区では安全を考慮して供給停止が行われることがある。また、ガスパ管へ想定を超える大量の水が流入した場合には、道路下のガスパ管の修理が必要となり復旧が長期化する

などの被害が考えられる。上水道に関してはマンションやオフィスビルなどで上水道に関する電源設備自体が浸水することにより断水が発生することが想定される。また、固定電話に関しては、通信ビルに停電に備えた自家発電設備等を設置しているが停電の長期化に加えて道路浸水等に伴う通行止めによって自家発電設備への燃料供給が不可能となった場合には電力枯渇によって通信サービスを使用できなくなる事が考えられる。携帯電話に関しても浸水による停電や通信ケーブルの断線等により基地局設備が機能停止となり供給エリア内の携帯電話が不通となる可能性が考えられる[10]。

江東デルタ地域は広範囲で浸水が長期間続くと想定されていることから、ライフラインの復旧も長期化し、長期間ライフラインが途絶した中で孤立者は厳しい環境下で生活することを余儀なくされることが予想される。実際、平成27年9月の関東・東北豪雨時に茨城県常総市で発生した鬼怒川の決壊による浸水ではライフラインの復旧が長期化した。常総市の約3分の1の40km²が浸水し、約11200世帯が停電、約11800軒が断水、約5000回線が不通になる被害を受けたが、停電の完全復旧に1か月半、水道の仮復旧に10日、通信障害の回復には1週間という長期間を要した[11]。

また、江東デルタ貯留型氾濫と同じく荒川が氾濫することを想定した荒川右岸低地氾濫でもライフラインの復旧が長期化することが見込まれている。この氾濫により東京都板橋区・北区・荒川区・台東区・中央区、埼玉県戸田市・川口市等の約98km²の範囲が浸水し、約126万人がその浸水区域内に含まれると想定され、そのライフラインの被害として電気・ガス・上水道・下水道・固定電話のそれぞれで最大約111万軒、最大49万件、約284万人、約399万人、約22万人加入の電話回線が被害を受けると想定されている。また復旧に関してはガス、上水道、下水道、固定電話の通信のそれぞれで数週間程度、数か月程度、数か月程度、排水・道路啓開後から3か月程度を要すると見込まれている。また、電気の復旧に関しては東京電力の設備のみで2,3週間程度、携帯電話の通信障害の回復にはエリア補完や電源設備等の仮復旧による復旧に数日程度、本復旧に数か月程度を要すると見込まれている[10]。

また日本の中心都市であることから、建物密度が高く(約13,000棟/約3,500ha)、さらには3階以上の中高層のビルが多いことも特徴である。寺藤[12]は、全国1896市区町村を対象に高層階の住民の割合として共同住宅の3階以上に居住する住民の割合を算出している。そのなかで、特に江東デルタ地帯を構成する墨田区、江東区、江戸川区の各区で共同住宅の3階以上に居住する住民の割合が全国でも上位に位置すると分析している。こうしたビルを自宅とする場合、洪水による浸水があった場合でも、あえてビルから出ずに滞在するという避難の意思決定も有効である。実際、自宅が河川から離れていることや平屋でないことが避難行動をしない要因となっていることも複数の避難後アンケートからも判明している。

Table.2-2 全国と比較した江東デルタ地域の共同住宅3階以上の住民の割合

(出典：寺藤[12]の報告データを抽出し編集を加えた)

市町村名	共同住宅3階以上の 一般世帯の住民の割合(%)	順位 (全国1896市区町村の内)
東京都中央区	80.6	1
東京都千代田区	77	2
大阪市西区	76.7	3
大阪府中央区	76.5	4
大阪府浪速区	75.2	5
大阪府北区	74.6	6
名古屋市中区	73.5	7
東京都港区	72.1	8
福岡市中央区	68.6	9
東京都江東区	68.4	10
⋮	⋮	⋮
(江東デルタ地帯)	(60.5)	(16)
⋮	⋮	⋮
東京都墨田区	52.7	23
⋮	⋮	⋮
東京都江戸川区	35.9	82
⋮	⋮	⋮

さて江東デルタ地帯の水害対策上の特性を整理すると、1)大規模水害が発生した場合には全領域が長期間浸水する恐れがあり、2)地域内のライフラインが停止する場合の被害規模が甚大であり、そして 3)水害の直接的な被害を避けられる高層階が密集しており、その居住者の割合が全国でも高いことが挙げられる。人口の多い都市部での水害発生に対し、1)や 2)のような事態が多く多くの住民に影響を与えることはもちろんであるが、特に3)の要素によって当該地域における水害対策はより複雑な様相を見せるようになっている。この点について、都市部と対照的な地方型水害への対策との比較を通じ、都市型水害の課題を議論する。

洪水・氾濫をはじめとした水害への住民側の対応として、まず迫り来る水害から身の安全を確保することがなによりも重要視される。大規模な浸水状態が想定される場合には、計画的に建設、あるいは認定された避難建物や高台、浸水域外への避難を起さなければいけない。特に想定浸水深下の階高をもつ低層住宅・建物に住まう住民は避難が必須であり、地方型水害においては自宅からいかに避難させるかという議論が重視される。また、避難を開始したとしても、安全を確保できる地点まで到達することが難しい場合もある。そこで、たとえば避難行動の負担が大きい高齢者等や避難の時間的猶予の少ない住民には建物上階への垂直避難を推奨するという対策がされている。

水害時の避難行動の目的を、“迫り来る水害から身の安全を確保すること”，であると定めれば、都市部において中高層階に住まう住民が多いという点は避難計画上大きな利点がある。それは想定浸水深よりも高い場所にいる居住者はそもそも避難の必要性がないという事実にある。避難経路上の混雑を回避するという観点からも、あえて遠方へ避難することによる避難時の被災リスクを回避したいという動機も生じやすい。そのため、“その場を離れない”という非避難や垂直避難の選択が有効かつ優位になる。結果として、水害発生後も浸水想定域内に留まるという判断を住民がとる傾向になる。

しかし、こうした浸水域外に避難しなかった住民の割合がさらなる課題を生むという構造こそが都市型水害の大きな特徴であると考えられる。都市部において、地域全体での長期間な浸水状態が想定されるなか、住民が域外避難を選択しない場合には、その後多数の要救助者が発生すると見積もられる。そして、浸水域でのボート救助活動の救助能力を大幅に超える状況となれば、地域住民の救助が全体的に遅れる、あるいは場合によっては救助できない住民がでてくるという事態につながる。救助活動の長期化に加え、水害によるライフラインの停止が重なれば、浸水域内で救助を待つ住民への負担がさらに増大する。つまりは、域外に避難する・しないという選択が、長期的には救助活動フェーズでの住民側の負担の多寡に大きく影響を与えていると考えられる。都市型水害においては、水害からの一時的な避難で済まず、その先の救助活動を含む長期的に被害が継続すること、そしてそうした事態を引き起こす要因が都市部に内在することに特に留意すべきである。こうした事態は稀にしか発生しない水害被害であることに加え、都市部という限定され地域において発生するととも稀有なリスクであるが、一度発生すれば甚大な被害を及ぼすケースである。

地方型の水害では、人口の少なさやあらかじめ避難する必要性が大きいことから大規模水害時においても要救助者の発生数は都市部と比べ大幅に少なく、救助活動そのものが独立して対策できる余地があるため、住民避難と救助活動を同時に検討することは極稀であろう。しかし、大規模な被害となる都市型水害においては、もはや住民避難と救助活動を切り離して議論することができない。このことから都市部での水害対策においては、住民避難や救助活動の対策を個別に計画することはもはや有効ではないと考える。大規模な要救助者の発生に対しもはや救助活動だけでは対処できないと想定されるなか、住民避難の改善や他の機関・組織との連携が重要になってくる。他方、住民側にも救助活動の実態を考慮し、長期的な視点で避難行動を選択するよう要請していく必要があるだろう。都市部での大規模浸水への対策は多様な災害対応やそのステークホルダーの視点から検討されなければいけない。その点、個別の事象を扱った従来のシミュレーションではこうした俯瞰的な対策を検討することが難しい。

そのため共通する地理空間情報をベースとした各種のシミュレーションを統合したプラットフォームを構築し、多角的な水害対策を検討できるよう準備することには一定の理がある。予測技術が事前に用意され、そのシナリオ設定の自由度を確保することで、上述した稀有な事象以外の分析にも適用できるという柔軟性にも期待できる。そこで、本研究では都市部での水害対策を検討するためのツールとして、住民避難・救助活動という2つのフェーズに限定し、災害対応プラットフォームの構築を目指す。また、その題材として上述した都市部における水害リスクを抱え、かつ大規模水害の発生が懸念される江東デルタ地帯を対象とした災害対応シミュレーションの構築や、それをを用いたシナリオ分析を実施する。

最後に、2.3 節で述べた環境マップ作成手順に則り作成した江東デルタ地帯の道路ネットワーク図を Fig.2-11 に示す。基本となる道路縁データは、基盤地図情報から取得し、江東デルタ地帯を覆う範囲を対象に、ネットワーク及びベクトルマップの作成を行った。環境マップ作成時には、計算領域内外の境界線を地図上で示す必要があるが、今回は河川に架かる橋を超えた先にある交差点を境界部分にした。シミュレーション上で住民を域外避難させるケースでは、この計算領域境界に近い交差点を外部への脱出点として設定するといった処理を取り入れている。

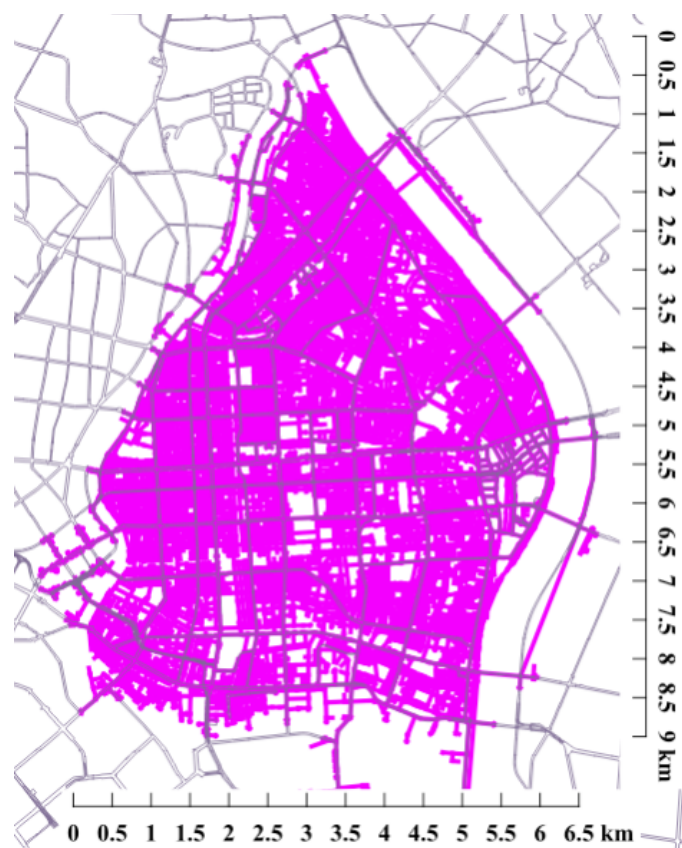


Fig.2-11 江東デルタ地帯の道路ネットワーク

2.5 洪水氾濫シミュレーション

2.5.1 シミュレーションツールの概要

水害を対象とした災害対応シミュレーションを実施するには、水害の到達時間や浸水状態といった災害状況を考慮しなければならない。例えば、洪水の市街地への流入時間によって、避難行動の猶予時間や洪水被災に影響がある。また、浸水状態によっては、ボートでの救助活動部隊が侵入できない経路も発生しうる。そうした自然災害の影響や時刻歴の変化を、人流シミュレーションにもデータとして入力する必要がある。

洪水発生時の江東デルタ地域内の浸水深さの変化を考慮する上で、iRIC の Nays2DFlood[13]による氾濫シミュレーションを利用した。iRIC 内で採用されている浸水計算の基礎式については、Nays2DFlood の HP を参照していただきたい。本研究では、江東デルタ地帯全域を計算領域として含め、降雨を平面 2 次元計算の流入条件として入力し、下流へと伝達する。また計算条件として構造格子を採用した。iRIC への入力データとなる、検討対象降雨は、1/200 規模の流域平均 3 日雨量約 550mm とした。またその降雨パターンは、過去に当該地域で長期浸水災害を引き起こしたカスリーン台風のものを用いた。

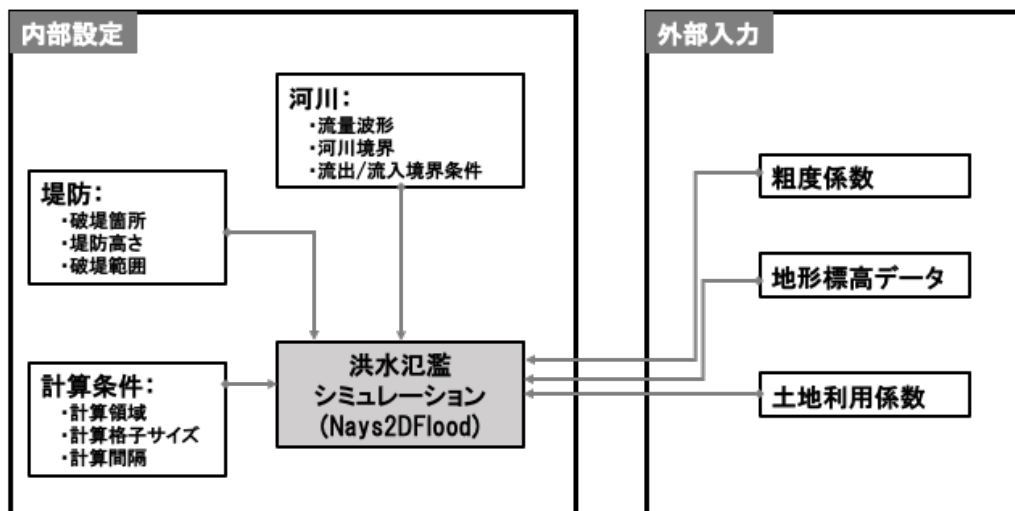


Fig.2-12 洪水氾濫シミュレーションの内部設定・外部入力関係

2.5.2 シミュレーション間のデータ連携方法

洪水氾濫シミュレーションの結果として、25m メッシュごとの時刻歴の浸水深さデータを得ることができる。これを人流シミュレーションでの災害状況として入力するには、2.1 節で述べた連携方法により、シミュレーション間のデータのやりとりを実現できる。ただし、本研究では、人流シミュレーション側からの環境マップ、自然災害シミュレーションへの作用は発生しないものとする。そのため、時刻歴の浸水深さデータの入力方法として

は, Fig.2-13 に示すように, 香水氾濫シミュレーション側で, 事前に計算結果を保存しておき, 人流シミュレーションを実施時にそれらを入力として与える構成とした.

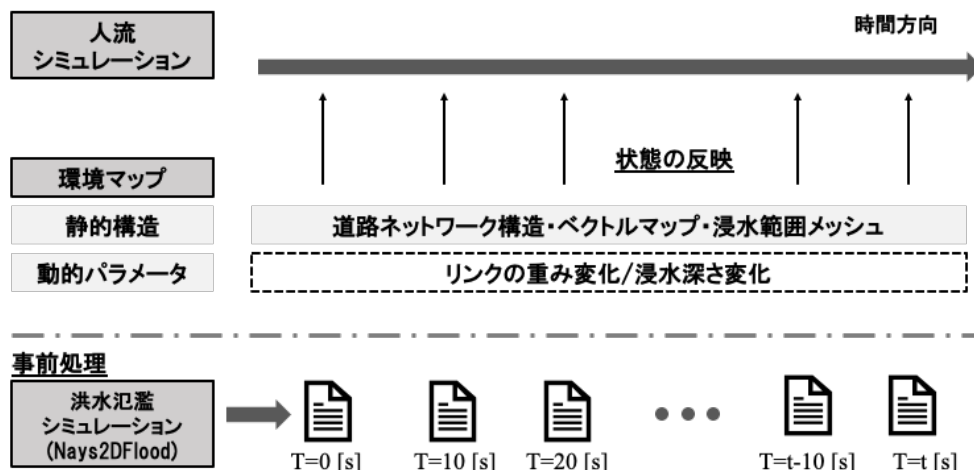


Fig.2-13 人流シミュレーションへの災害状況の入力方法

このデータは, 江東デルタ地帯全体を覆う均等グリッドであり, ベクトルマップ同様に, 住民の地図上の位置から, その地点の浸水深さを参照することができる. シミュレーション上では, 人エージェントの現在位置と, その場の浸水深さを検索することで, 被災の有無や避難の実現可能性を評価している. また, 予め出力しておいた時刻歴の浸水深さデータにより, 一定間隔で環境マップ上の浸水範囲・深さメッシュの値を更新する. 今回は, 計算コストや浸水深さ変化のスピードを考慮し, プログラム上での計算時間で, 10 秒間隔ごとに浸水状況を反映させるようにした. これにより, 人エージェントの活動環境の動的な変化情報として与える.

2.5.3 浸水状況による環境マップの変化

水害による浸水状態が長期間継続する場合, あるいは排水処理により浸水状態を改善できる場合, 市街地内の浸水状況は時間経過で変化することとなる. こうした状況を踏まえると, 浸水状況によってはゴムボートを漕いでは通れない経路や, 逆にゴムボートに乗船して移動しなければいけない経路も発生する. このためボート救助活動の視点では, 浸水状況の変化が, 救助部隊の移動経路である道路ネットワークへの影響を与えているといえる.

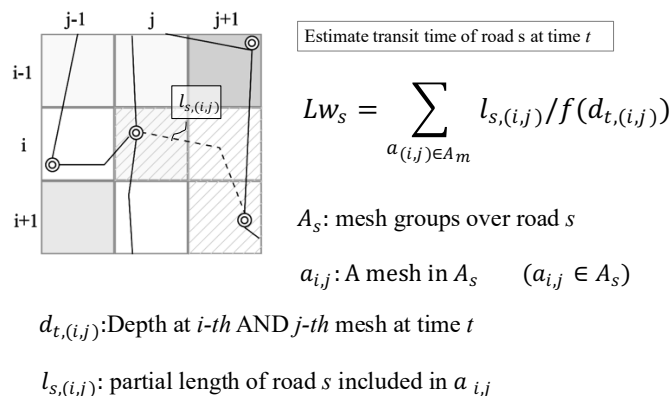


Fig.2-14 浸水状態による移動速度の低減を考慮したリンク重みの計算方法

移動手段に応じて移動速度も変化し、道路を通過する移動時間にも影響を与えることから、道路ネットワーク上の各リンクの重みも変化することに留意する必要がある。Fig.2-14に動的な環境変化を考慮した市街地の道路ネットワーク表現を載せておく。エージェントが浸水深さに応じて、移動手段を変更できるように、浸水状況の変化を知覚できる必要がある。そこで、メッシュ単位の浸水深さの時刻歴データを道路ネットワークのリンク重みの時間変化として捉え直している。

具体的には、氾濫シミュレーション[13]での浸水メッシュとそのメッシュ上を通過する各

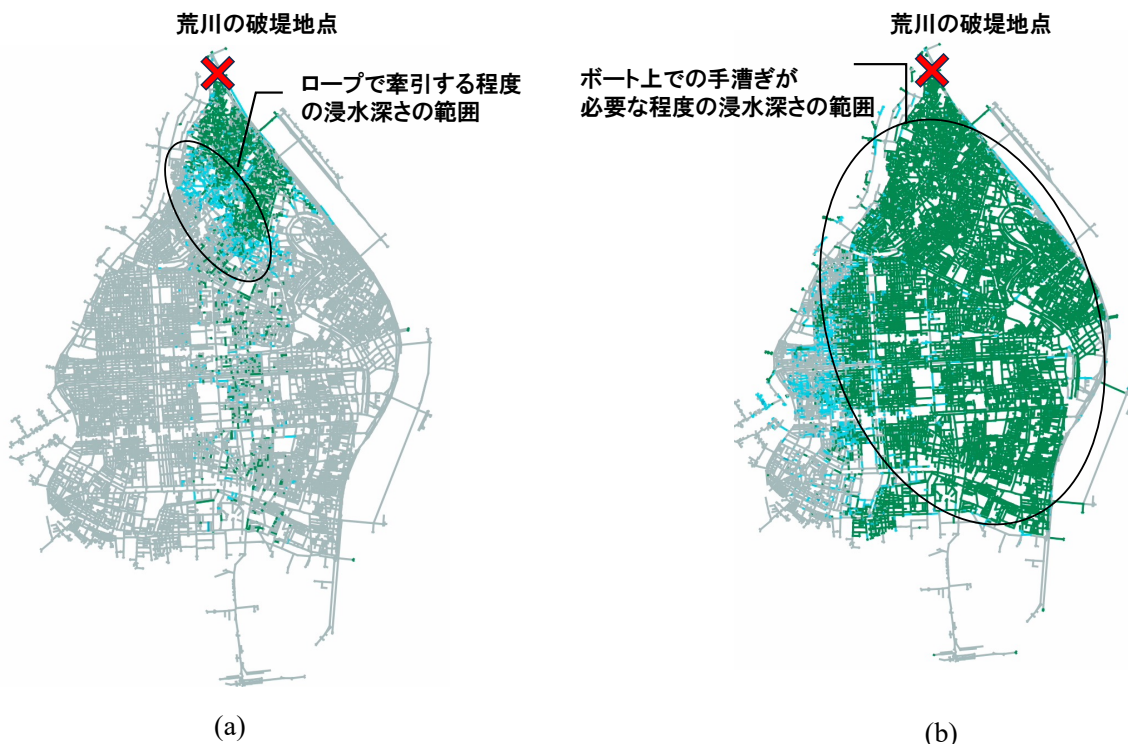


Fig.2-15 浸水深さのメッシュデータをリンクデータへの重みへと変換後の様子

道路リンクを GIS 上で紐づけた。それにより、浸水深さのデータをメッシュ単位からリンク単位に転写する。さらに、第 3 節で説明する移動速度[14]を考慮して、各リンクの通過時間に補正をかけることで、道路ネットワーク内の各リンクの重みが時間で変化するという表現に変換した (Fig.2-15)。この変換により、救助エージェントが最短経路で移動すると想定した場合には、浸水深さの変化によって、選択するパスを自動で変更するという仕組みを可能としている。

2.6 各種活動モデル

ここまで江東デルタ地帯という具体的な市街地での水害対策を検討する上で必要なシミュレーション環境や洪水・氾濫シミュレーションの設定を行った。本章の最後として、プラットフォーム上で定義・実装する災害対応活動モデルについて説明する。

本プラットフォーム上で各災害対応のシミュレーションを実行するには、Fig.2-1 で示したように共通の市街地マップ上で災害対応を表現していくようにしている。これにより、各災害対応モデルの詳細な内容は異なるものの、その動作に必要な環境要因は共通して参照することができる。よって、Fig.2-16 のようなシミュレーション計算フローをプラットフォーム上で実現している。図表内の”活動モデル”は、各災害対応の活動内容に応じて代替されるものとなっている。

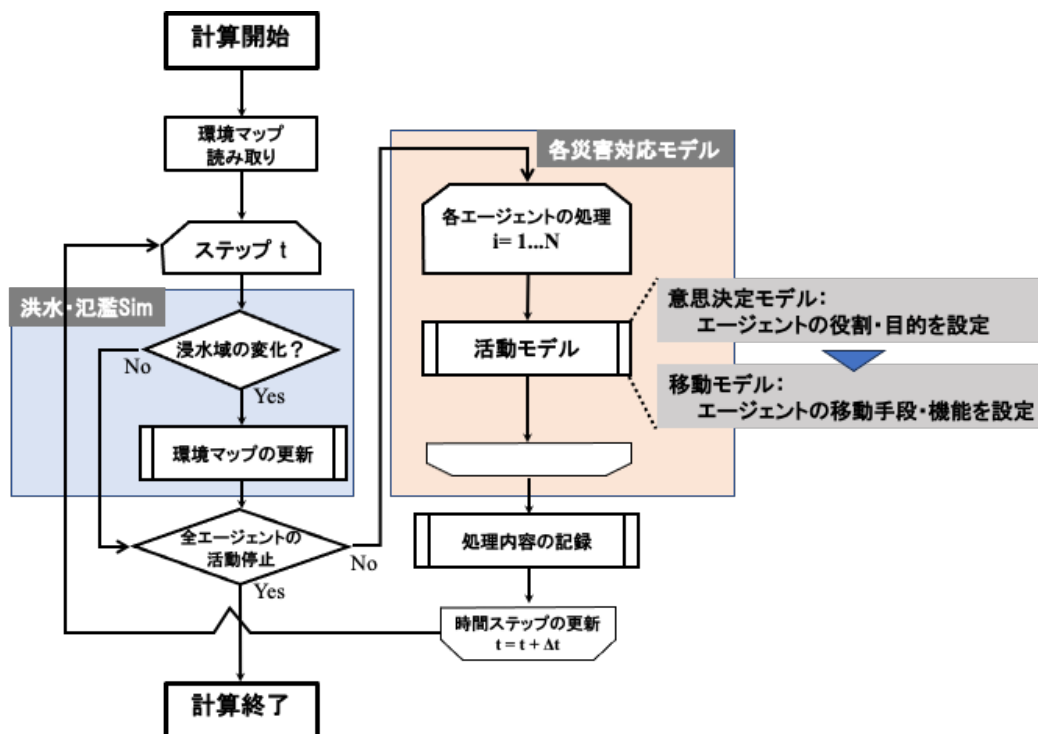


Fig.2-16 本プラットフォーム上でのシミュレーションフロー

本プラットフォームで使用するシミュレーションさらにこの活動モデルを1)意思決定モデルと2)移動モデルに分けて実装する。1)意思決定モデルは各エージェント(活動主体)の役割や目的を既定する移動のトリガーである。2)移動モデルは、エージェントの移動手段に基づく、移動速度や機能を表現するものである。意思決定モデルはシミュレーション内のエージェントの挙動を支配する特に重要な要素であるが、その内容を前もって規定することは容易ではない。例えば、住民の避難判断のメカニズムは完全に解明されているわけではなく、また汎用的なモデル記述も見当たらない。また救助活動での意思決定にあたる救助戦略は比較的制御ができる部分も多く事前に効果的なモデルを規定することも可能である。しかし、戦略の有効性が被災状況によって、あるいは戦略への選好性が地域ごとに異なる可能性があることから、救助方針も柔軟に設定できるほうが好ましいだろう。

そのため、活動モデルから意思決定部分を分離し、必要に応じて置換・改善できる仕組みにすることとした。他方、残りの移動モデルに関してはエージェントの属性や役割によって事前に規定することが比較的容易であると判断した。そこで、住民避難については移動モデルを中心に構築し、意思決定部分のアルゴリズムはシミュレーション使用時に改めて記述することとする。また、救助活動の大枠は救助活動マニュアルを参考に本章で定義し、誰から救助すべきかといった救助方針については第4,5章で設定する。

2.6.1 住民避難における歩車混合移動モデル

まず、発災直後の人の避難行動について記述する。本章で設定する避難モデルについてFig.2-17に示す。住民避難での移動手段として歩行移動を前提する研究が多いが、東日本大震災における津波避難においては、車避難のケースも多く、避難者による道路閉塞を塞ぐ手段として、歩車の併用や交通制御などの必要性も明らかになっている[15]。そのため、本プラ

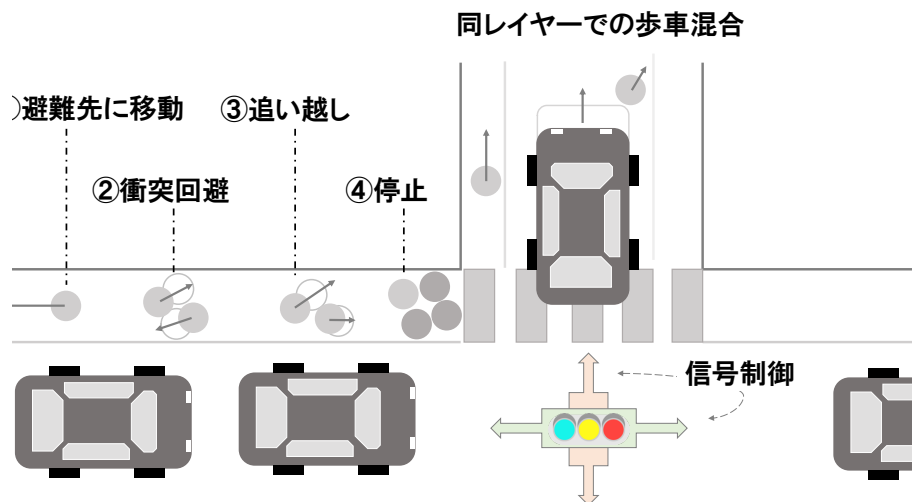


Fig.2-17 歩車混合移動モデルの概要

ットフォームのなかでも車両での移動も重要な要素として取り入れ、歩車混合の移動モデルを構築する。

既往の研究を俯瞰すると、歩車混合状況を表現する際の歩車の扱いについて幾つかの類型が存在し、1) 車両移動と歩行移動を別レイヤーとして扱い、各手段での避難時間を推定するもの[16]、2) 歩車を同じレイヤーで扱うもの[6]、に分けられる。また、移動モデルを構築する際に使用する環境マップ表現も、ネットワークモデルや形状再現モデル(第2節参照)などに大別される。ネットワークモデルを活用したモデルでは、比較的簡潔な計算で避難時間や状況を推定できる。一方で、人の認知バイアスや意思決定エラーなどの非合理的行動を考慮する際には、個別的に挙動を記述可能なエージェントシステムが有効であるといえる。そこで歩車混合を同レイヤーにおいて動作させる場合には歩行エージェントと車エージェントが相互作用する形を表現するために後者のモデルを採用する。

歩行移動と車両移動についての基本的な移動モデルを設定する。

- 1) **Foot:**歩行移動では、幅員の広い道路などで歩道が附属している場合は歩道内を自由歩行空間として移動し、細い道路などで歩道が明確に区別されていない場合は道路の両端を移動する。歩道の有無や領域については国土地理院が提供する基盤地図情報[17]から作成した。また、歩行での移動速度については、避難速度を調査した報告書[18]を参考に、歩行者の年代によって平均速度を変えている。
- 2) **Car:**車両移動では、道路に沿って最高速度 60[km/h]で進むことを原則にする。ただし、赤信号での停止や前方車両との車間距離確保のために、加減速を行う[19]。実際には上記の加減速の影響や歩車との衝突回避時の減速により、シミュレーション内で移動する車両の平均速度はさらに抑えられている。

上記の移動手段ごとの移動モデルに加え、歩車混合を検討する上で重要な衝突回避も考慮する。人と人、車両と車両、そして人と車両がお互いに衝突の危険性がある際には、何かしらの衝突回避行動をとっている。

まず、人の避難行動についてはより流動的であり、人と人の隙間を掻い潜り、より前方へ進もうとするだろう。エージェントモデルにおいても、同様の現象するため、他のエージェントを知覚し、回避するための行動を実装する必要がある。ロボティクスの分野では、従来より衝突回避のためのアルゴリズムが検討されてきた。その中でも HL(Human-Like)アルゴリズム[20]を採用して、衝突回避全般処理の基礎として実装した。

HL アルゴリズムの概要を Fig.2-18 に示す. 本アルゴリズムの特徴は, エージェントが視野を持ち, 視覚範囲内の他のエージェントとの衝突回避のため, 次の移動ポイントを計算するアルゴリズムである. Fig.2-18 で示したように, 自エージェントは, あるエージェントとの予想衝突時間・衝突位置を移動方向ごとにあらかじめ計算する. 同様に, 他の全てのエージェントの予想衝突位置を前もって計算する. これらの計算結果を踏まえ, 今度は移動方向ごとに, 最初に衝突するエージェントとの衝突位置を求める. 最後に, 自エージェントの目標に最も近い地点を求めることで, 次の移動先を決定している.

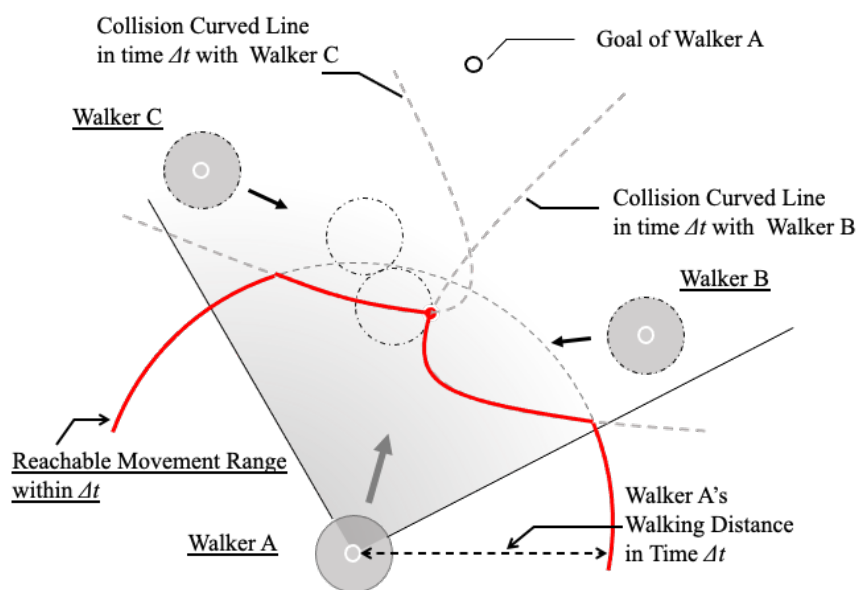


Fig.2-18 衝突回避における HL アルゴリズム[20]

アルゴリズムの採用理由として, 1)計算効率の良さ, 2)知覚に基づく人行動の説明が適切

1)については, HL アルゴリズムが視野を用いて, 計算対象を絞っているという部分に該当する. 市街地内に散りばめられたエージェントは, 総数も多く, また距離的に離れていることも多い. そうした条件下で, 全てのエージェントとの計算が必要な RVO[21]や視野を考慮した改良型として ORCA[22]よりも計算効率が良いといえる. 2)については, 人は見えているものを意識して回避行動を取るといふ, 経験的にも見解が一致しやすい挙動をとる.

また, 降雨氾濫においては, 津波と比べて災害の進行速度が比較的遅いことや住民の認識として避難の意識が低いことから, 極度の切迫した避難意識が持たれるとは言い難い. そのため, 住民の避難行動も比較的落ち着きがあり, 目的地に向かって円滑に移動するといった挙動にも適したモデルと判断した.

次に, 車両の衝突回避については, 歩車間では衝突予想時に車両が停止あるいは, 歩行者が道路外周へ移動することで車両の移動を行えるようにする. 車両間では, 幅員の細い道

路で対面衝突回避では、お互いすれ違うように移動し、それ以外の場合は衝突予想時には、一定の車間距離をあけて停車するものとする。その際の加減速についてはマイクロシミュレーションでの車両モデルの速度モデルを構築した花島ら[19]の式を参考にした。

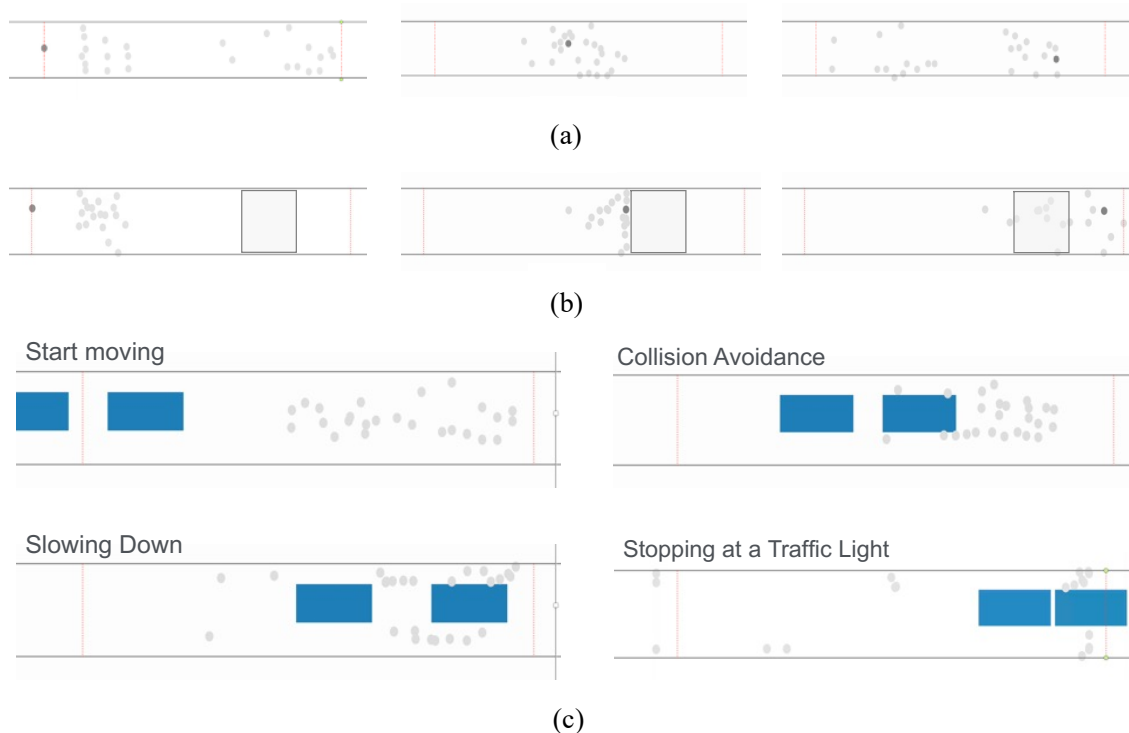


Fig.2-19 歩車混合モデルの挙動:

(a)は異なる速度の歩行者のスムーズな動き。(b)は交差点での歩行者の待機と再移動を示す。(c)は、歩行者と自動車とが混在する環境において、各エージェントがどのように行動するかを示している。

2.6.2 浸水域におけるボート救助活動モデル

以降は、救助エージェントの具体的な行動について説明する。

救助活動内容としては、消防隊や自衛隊といった公的機関によるボートでの孤立住民の救出・搬送としている。本来は、住民の搜索という段階も活動内容には含まれるが、孤立住民の配置と救助時間の関係性に着目する上で、搜索活動を考慮せず、活動プロセスを簡略化している。

Fig.2-20 に救助モデルの概要を示す。浸水域での活動は、移動速度が遅く、瓦礫などの障害物による影響を受けやすく、地上での活動と比べると活動環境に大きな制約を受けてしまう。また、水上を移動する主な手段であるボートには乗員上限があり、救助プロセスそのもので多くの時間を要する[8]。こうした地理的・活動的制約を考慮したモデルが浸水域で

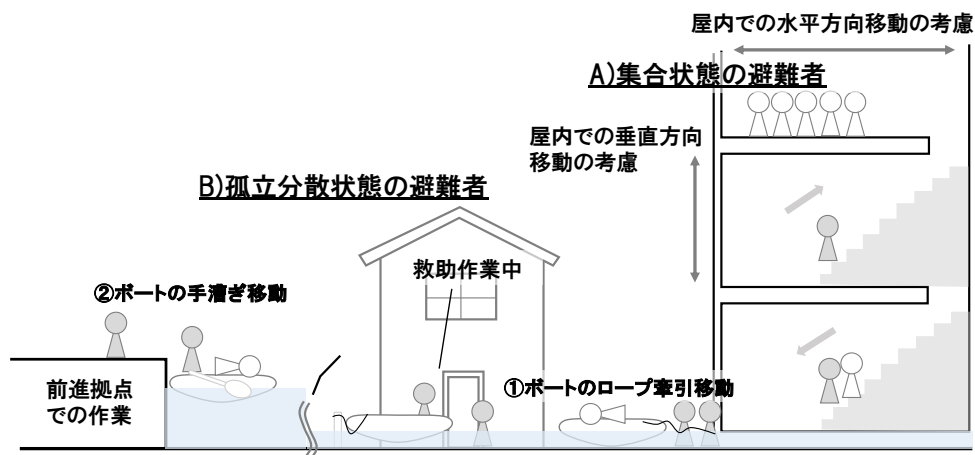


Fig.2-20 浸水域でのボート救助活動モデル

の救助活動を再現する上で求められる。

さて、浸水域内の救助活動として、ボート移動を想定する。その際、浸水域内の安全な移動経路を選択するために、道路上をボートで移動することで、十分な幅員や視界を比較的広く確保するものとする。そこで、エージェントの移動経路として、当該市街地の道路ネットワーク構造を利用する。浸水域での救助活動を検討する際には、ボートでの救助を想定することとなる。現在行政等が保有しているボートのうち、多くはゴム製ボートとなっている。ゴムボートは、必要時に空気を入れることで現場に導入できるため、普段は圧縮して保管でき、備蓄および携帯が比較的容易であるといえる。

一方で、ゴム製のボートは破損しやすいという特性をもつ。例えば、水位が比較的低く、地面の瓦礫などにボート底が触れると破損する可能性がある。そこで、水位が低い際には、ボートから降りて、ロープで牽引する必要がある。このように浸水深さによる歩行困難性や、低水深時の流木等の障害物によるボートへの障害を考慮した移動手段の変更が求められる。そこで浸水域内のボート移動手段としては、1) 救助隊が浸水した状態でのボートのロープ牽引移動、2) ボート上での手漕ぎ移動、の2種類に分かれる。そうした水害特有の動的な環境変化に適用できるエージェントモデルを構築する (Fig.2-20)。

1) 救助活動の前進拠点

浸水域内での救助の目標としては、1) 浸水域内の孤立住民を浸水領域外に救出あるいは、2) 浸水域内のより安全な避難ビルに集約する、というものが考えられる。住民の安全を確保するという観点では、1) のように浸水外へ救出してしまうことは有効であり、またボートの不足する事態においては2) のように一時的に避難ビルに住民を集めてから、集中的に救助することで、移動やリソースの分散の手間を省くことができる。そのため、救助活動中には

浸水域内外の境界線や浸水域内に、活動拠点である前進拠点を設置することが一般的である。本研究でも、そうした方針に則り、前進拠点を要所に設置する。救助活動中、救助エージェントはこの前進拠点を中心に住民の救出に向かい、また救出した住民は前進拠点において他の陸上部隊などに受け渡しするものとする。

2) ボートの能力

ボートでの移動については、浸水深さに応じて変更するものとする。具体的には、水深の浅い箇所では、ロープでの牽引とし、深い箇所では手漕ぎ走行とする。

その際の移動速度については、人が歩行可能な水深を 70cm と想定[14]し、それ以下の水深での歩行速度については線形に変化[24]すると見立て、浸水深さごとの歩行速度を調整した。また、浸水深さが 30cm 未満のとき、ボートの底が道路に接触し、船底部分を損傷する可能性があることから、ボートでの移動を不可とした (Fig.2-21)。

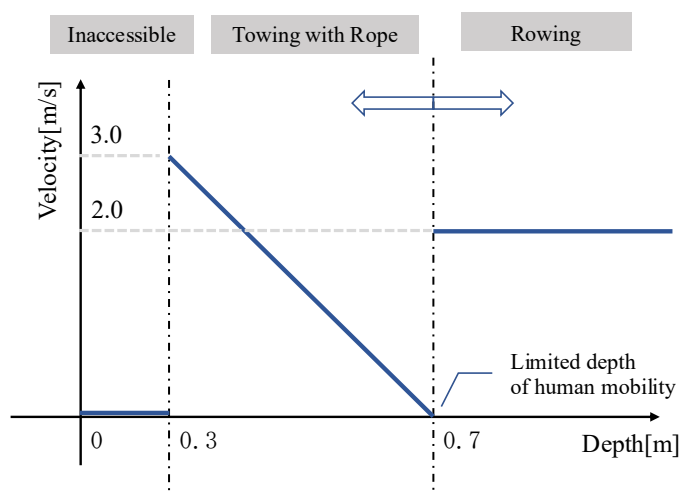


Fig.2-21 エージェント位置における浸水深さと移動手段・速度の関係性

最後に、ボートの乗船定員は、既存の活動マニュアル[24]などを参考にして、隊員を除き 2 名とした。このように、ボートそのものに乗船定員があるため、救助した住民を浸水域外に運び出す必要がある。そのため、救助活動中は前進拠点を起点救助地点とのパスを幾度も往復する必要がある。前進拠点、救助地点での住民の乗り入れや着岸作業など、移動時間以外に一定の時間がかかる。

そこで、池内らの文献[8]を参考に、一連の作業時間のフローを Fig.2-22 に示す。この文献では、今回の研究対象領域と同じエリアを扱っており、浸水対策時のリソースや活動プロセス、活動ごとの必要作業時間を、業務に関わる当事者へのヒアリングを通してまとめている。実際の活動では、乗員の熟練度や作業への障害の発生によって、作業にかかる時間は大きく変動すると想定される。ただし、今回はヒアリングを通して得た必要作業時間の想定を、救助

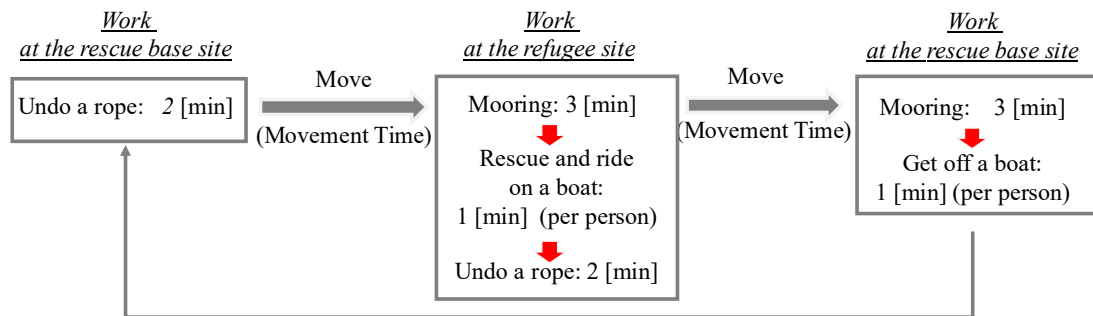


Fig.2-22 救助地点及び前進拠点における救助作業プロセスのフロー

モデルでの作業平均時間として導入し、簡易的に記述した。

また、孤立住民が密集して待機していると想定される避難ビル内での移動時間を考慮する。避難ビルとして指定される建物は高層であるか床面積が広大であることが多い。そこで地上階から侵入する救助隊が、孤立住民が待機する階までの移動時間を新たに考慮している。具体的には救出にかかる時間を安全側に評価し、

a) **建物内での水平移動**：建物の床平面形状とその大きさを考慮し、建物への突入口から建物平面上で最も遠い地点までの距離を水平移動距離とした。その移動距離を救助部隊の歩行速度 (1.5[m/s]) で移動するとして建物内での各階の必要移動時間とした。

b) **建物内での垂直移動**：建物の各階の高さを標準的な 3.5[m] として設定し、部隊のみ或いは比較的健康的な年代 (20-50 代) の救出作業時の階段昇降時間を 30[s] に、高齢者や子供の救出作業時の階段昇降時間を 60[s] とした。既往の報告 [25] によれば、高齢者単独での階段の小高層度が 0.21[m/s] であるため、余裕をもった救出時間を設定している。

3) 分散救助

計算開始後、各エージェントは事前に設定された各前進拠点に配置され、それぞれの前進拠点をスタート地点として救助活動を開始する。ボート救助においては、移動時間の削減のため、浸水域内での分散救助を前提とし、前進拠点ごとに適度に分割された領域ごとに救助する対象住民をあらかじめ想定する。

その領域の分割手順については、前進拠点を中心としたネットワークボロノイ分割で行った。ネットワークボロノイ分割は、母点からの距離ではなく、母点を起点とするネットワーク上の距離に基づいて領域を分割する方法である (Fig.2-23)。分散救助では、実際の移動経路長さを反映した移動コストを平等にするように、領域を分割するのが妥当と言える。そのため、地点間の直線距離ではなく、道路ネットワークの経路長さに応じた分割を行うネットワークボロノイ分割を採用している。また、エージェントは移動点間を最短経路で進むもの

とする。

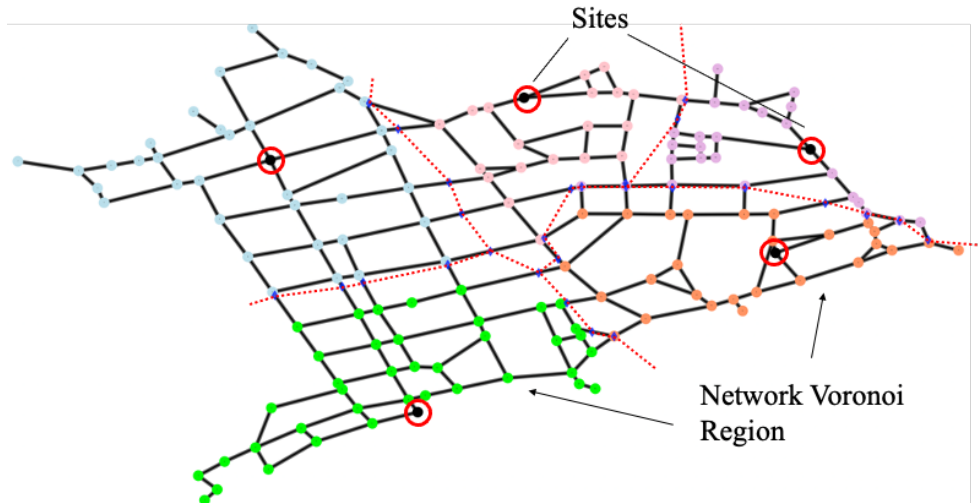


Fig.2-23 ネットワークボロノイ分割手法によるリンクベースの領域分割例

救助エージェントの状態遷移フローを Fig.2-24 に示す。救助エージェントは、各状態から次にとる行動を選択する。以降、図表内の各状態について簡単な説明をする。

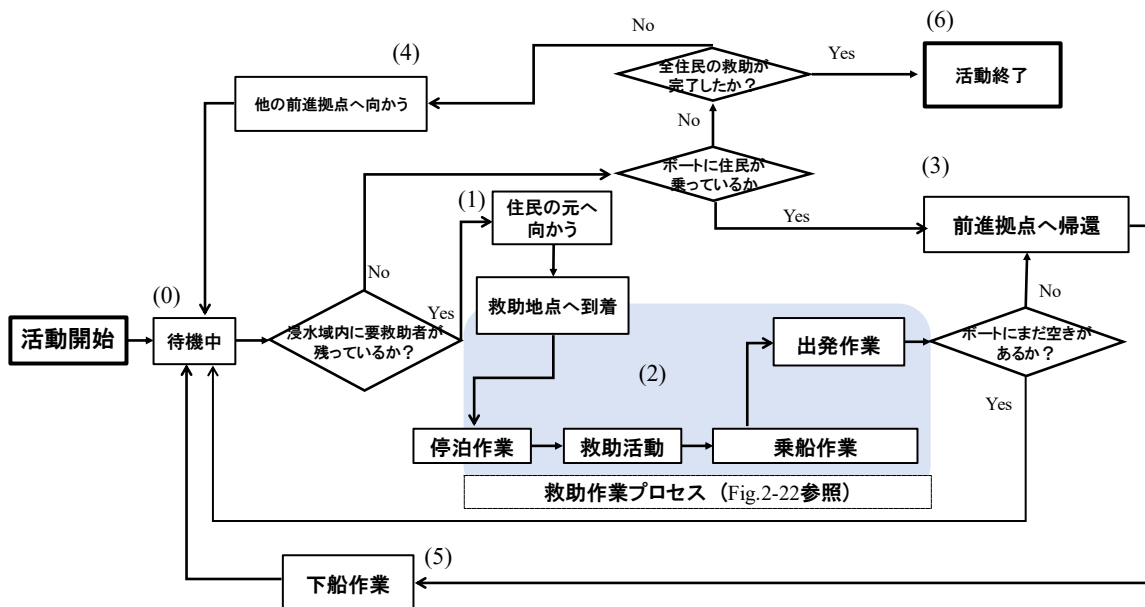


Fig.2-24 救助エージェントの状態遷移フロー

(0) 一人の住民の救出作業後、あるいは前進拠点への帰還後の状態を示す。次に、領域内の要救助者の状況を考慮して、次にとるべき行動を検討するための状態である。シミュレーション開始後の各救助エージェントの初期状態でもある。

(1) 領域内に要救助者がいる場合は、救助方針に従い、次に救助に向かう地点を選択し、移動を開始する。

(2) 要救助者が待つ地点に到着後、Fig.2-24 が示すプロセスに沿って、救出作業を進める

(3) 孤立住民の救出後、a)まだボート定員に空きがあるが、担当領域内に未救助の住民が残っていない場合、b)ボート容量上限まで住民をボートに乗せている場合、には一度配備先の前進拠点に帰還する。

(4) 前進拠点からの出発時、担当領域内で既に孤立住民が救出された場合には、他の前進拠点の内、最も多くの孤立住民が残っている拠点へと応援に向かう。

(5) 住民をボートに乗せて、前進拠点までは搬送する。前進拠点に到着後は、Fig.2-24 のプロセスに従い、住民をボートから降ろす作業をする。

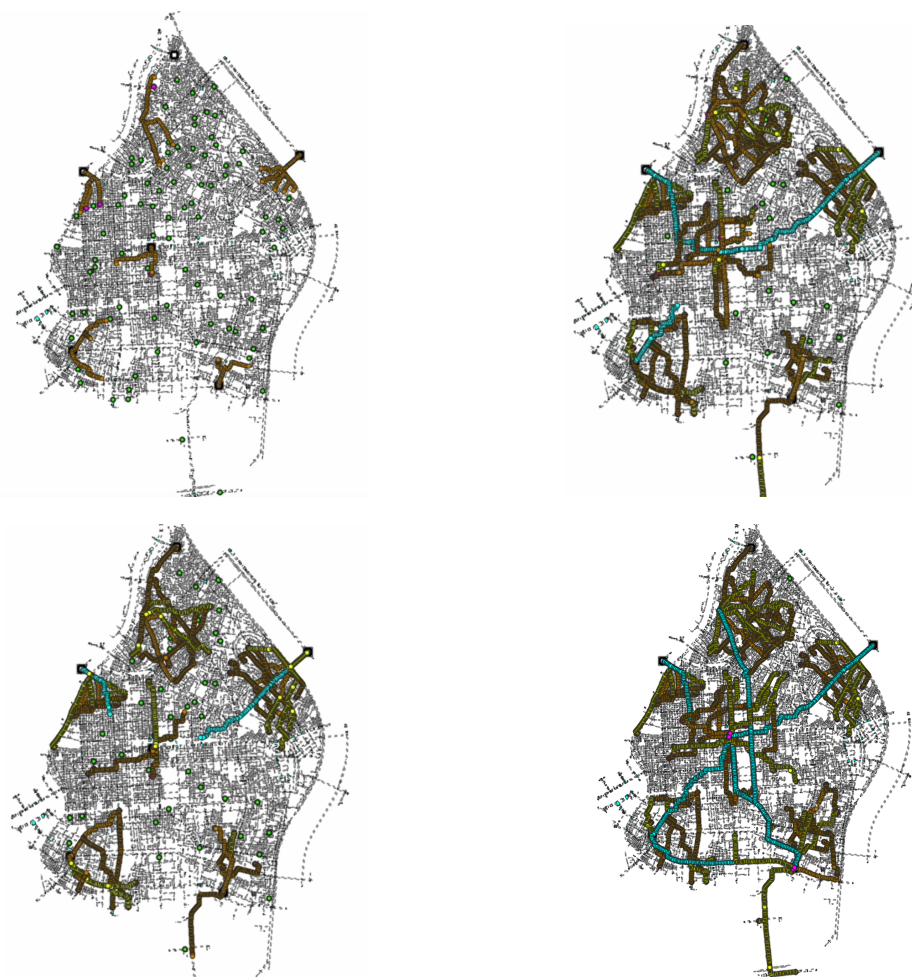


Fig.2-25 作成した救助シミュレーションの様子:

図中の線は救助艇の軌跡を表している。茶色の線は周辺住民への移動、黄色の線は基地への帰還、青色の線は別の基地を支援するための移動を示す。

(6)全ての領域で既に要救助者がいない場合には、エージェントは個別に行動を停止する。なお、全てのエージェントが状態(6)に到達した時間を救助活動の終了時間とし、シミュレーションを停止する。今回用意する救助エージェントには個体差をつけず、全て同等の機能・役割をもたせている。また、個々のエージェント間の直接的な情報共有はされず、要救助者の残存マップを中心に個々のエージェントが独立して行動を判断する。全エージェントはこのマップ情報を共有しており、個々のエージェントの行動結果がこのマップに反映され、他のエージェントの意思決定に影響を与えるという構造である。また、救助効率の改善や救助活動の最適化が今回の目的ではないため、学習メカニズムといった知的処理は導入していない。

最後に、ここまで構築した救助シミュレーションの挙動を Fig.2-25 に図示する。

2.6.3 排水処理作業モデル

浸水域内での排水処理は、主に市街地の復旧・復興を目的とした作業である。この災害対応プロセスでは、排水ポンプ車や排水機工場、水門を手段とし、市街地内の氾濫水を河川や海へと放出することにより浸水状況を改善していく。これらの作業は、本来救助活動とは別の活動主体が行うものであるが、この排水処理を救助戦略の一つとして考慮していく。

Fig.2-26 に本研究で構築する排水処理モデルの概要と計算フローを示す。このモデルの主な特徴は、浸水域内の総水量に対し、排水処理能力に応じた水量だけを、浸水域全体で均等に減少させるというものである。水は高位の場所からより低い場所へと流れ込むため、長期的に見れば、浸水域内の各地点での水位の変化は場所を問わず同じ状態とみなして良い

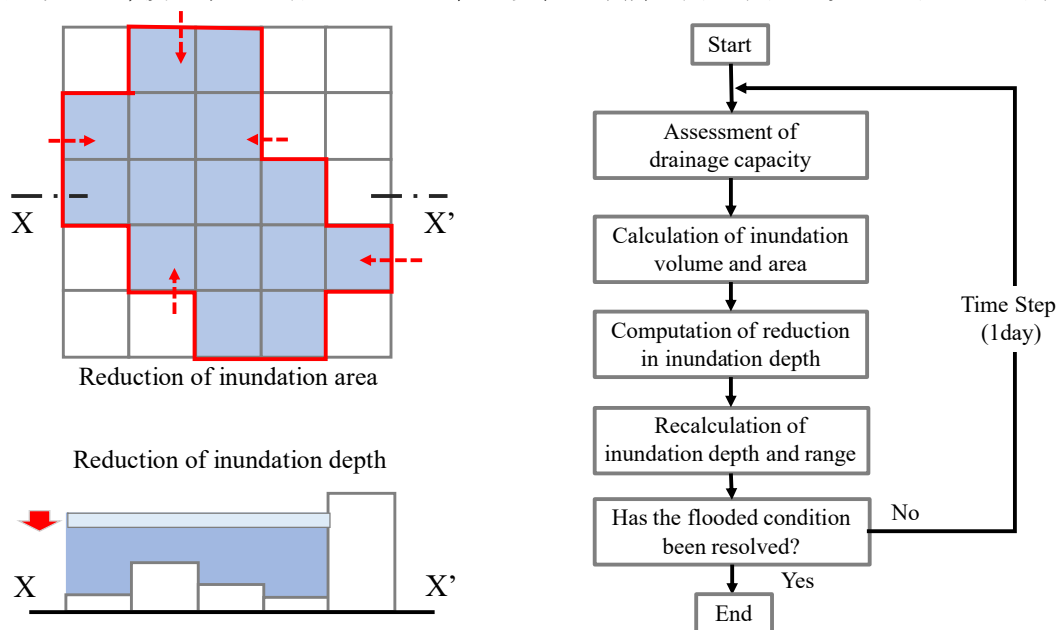


Fig.2-26 排水処理モデルの概要と計算フロー

と考えられる。そうした発想に基づき、浸水域内での排水処理についての簡易的なモデルを構築した。主な処理内容は以下の通りである。

1) 排水処理能力の評価:

各計算ステップ開始時に、排水能力を評価している。今回排水処理能力を有する手段としては、排水ポンプ車や排水機工場を想定している。これらの機能は時間経過によって増幅、あるいは低減、もしくは停止するという可能性が残されている。例えば、排水ポンプ車両は、排水処理を開始したあとも他の地域からの追加車両を提供される可能性がある、また、排水機工場では、その立地上、工場が浸水下にある場合には排水機を稼働できず、またインフラが停止している場合には、燃料が一定期間で枯渇する危険性が存在する。これらの点を踏まえ、計算フローのなかでは排水作業期間中の排水処理能力の変化を評価できるようにしている。

2) 浸水範囲と総水量の算出:

つぎに、排水対象となる浸水範囲とその水量を計算する。前節で使用した洪水氾濫シミュレーションでは、その出力結果としてグリッド形状の浸水データを得られる。また、その各グリッド内には、浸水深さや流速といったパラメータが導入されている。浸水範囲の算出では、この浸水深さの値が 0.0[m]より大きいグリッドの面積を合計し、浸水範囲全体の総面積を求めることにした。同時に、各グリッド内の浸水深さと単位グリッド面積を掛け、それらを浸水範囲全域で足し合わせることで、浸水域内の水量を計算した。

3) 浸水領域内の水位低下量の計算:

ここでは、1)の排水処理能力と 2)の浸水範囲と水量の計算結果を踏まえ、各計算ステップでの浸水深さの減少を算出する。本研究では、浸水範囲全体で均等に浸水深さが変化すると仮定している。そのため、ここでの浸水深さの減少量は、浸水範囲内の全水量を、その時の排水処理量で割った値となる。

4) 浸水範囲の再評価:

排水処理後の浸水状況について再計算を行う。前プロセスにより、浸水範囲全体で浸水深さが減少することになるが、これにより一部のグリッドではその浸水深さの値が 0 以下になる。このことは、そのグリッド内での浸水状況は解消されたことを意味しており、次の浸水範囲の計算では省く必要がある。そのため、浸水深さから各グリッドの浸水の有無を再計算する。

5) 浸水状態が完全に解消されたかの判定:

この排水処理モデルの計算終了条件として、計算領域内の全てのグリッドにおいて、浸水状況が解消されているかどうかを判断している。まだ浸水しているグリッドが存在してい

の場合、時間ステップを進め、再び1)の処理に戻る。計算を終了した場合には、浸水状況を解消するのに要した日数を各グリッド内に記録する。

上記の 1-5)によって、本研究での使用する排水処理モデルを構築する。なお、このモデルでは浸水域内の水が一定箇所に集約して排出されることが期待できる地形、つまりはバスタブのような形状をもつ地理地形を想定したものである。より複雑な地形条件における排水処理では、異なるモデル構築が必要であることを注意していただきたい。この点を踏まえ、各排水設備の配置条件は今回の排水処理モデルには影響を与えず、あくまで排水処理能力だけを考慮している。

2.6.4 各モデルの入出力内容の整理

本章の最後に、本節で定義した各災害対応モデルのデータの入出力内容についてまとめて整理する。

a) 住民避難モデル

避難モデルでの計算に必要なデータとしては、避難開始前の住民の初期配置や避難の経路や目的地となる地理空間情報である。住民の初期配置については、モバイル空間統計データ[25]をはじめとするメッシュ形式の人口分布データから作成される。メッシュ内の人口をもとに、一定の割合で歩車を分配し道路上や建物屋内に配置する。この歩車の混合割合は、たとえばパーソントリップ調査の結果を採用することができる。また、道路と建物内への配分は自由に設定することができるが、本研究では各要素の占有面積によって均等配分して

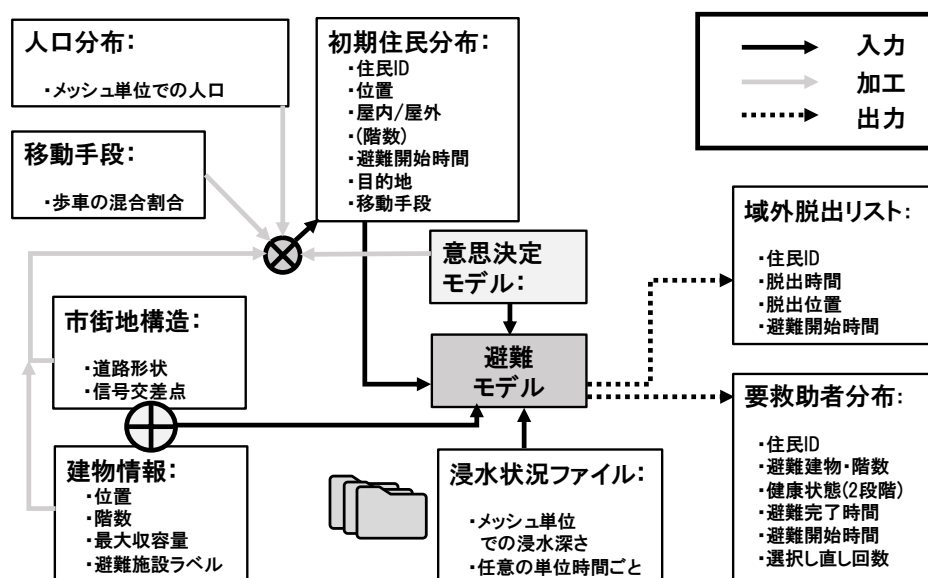


Fig.2-27 住民避難モデルの入出力関係

いる。各初期位置に配置後、住民は 2.6.1 項の移動モデルにより目的地へと向かう。

さて、住民の避難の有無や目的地、経路等については個々の状況に応じて変動するはずであり、そうした行動の判断を決定する要素が意思決定モデルである。住民の避難意識モデルに関する研究は近年注目されているものの、いまだ汎用的なモデルが存在していないことも事実である。そこで本研究ではこの意思決定モデルの内容を規定せず、各シナリオ分析時に改めて導入するというアプローチをとった。しかし詳細なモデル内容に関係なく、最終的な住民の避難判断の要素を、「避難開始時間」「目的地(域外/域内)」「経路」で統一している。

その他、浸水状況のデータでは、住民の被災の有無や避難の可否を判定するための材料としている。本モデルの出力結果は「浸水後住民がどこに滞在しているか」を記したリストであり、その後の救助活動の対象かどうかによって、浸水域外と域内に分けて結果を出力している。

b) 救助モデル

救助モデルにおいても最低限必要な入力データは要救助者の分布状況である。建物情報と連携させることで、「どこの建物の何階に避難しているか」という位置情報を付与されたデータとなる。このデータを擬似的に作成することもできるが、前項の避難モデルの出力結果を用いることで、避難と救助の連続性を表現できる。この住民の位置情報を前提に 2.6.2 項

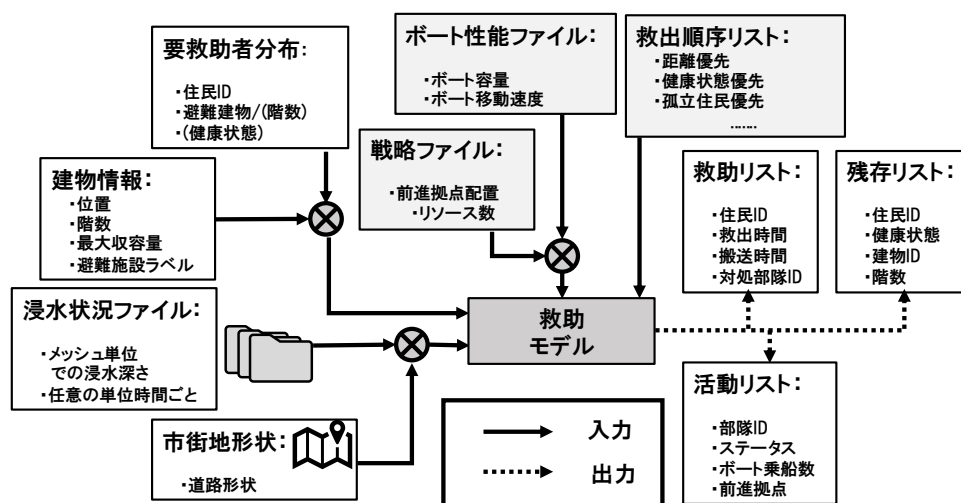


Fig.2-28 救助モデルの入出力関係

で定義した救出作業や搬送作業を行うものとする。

その他、救助戦略の一部として前進拠点の配置やボートリソース数、ボートの機能を個別に設定できる。これらは計算対象の行政情報等を参照することが想定される。また、救助モデルにおける意思決定部分では、「どの住民から救助するか」という救助手順に限定した。この

意思決定モデルについても個別に作成,代替ができるものとする.最後に,救助モデルの出力データとしては,住民の救助リストや救助部隊の活動リスト等とし,救助パフォーマンスを多角的に評価できるようにしている.

c) 排水処理モデル

排水処理モデルでは,ある一時点での浸水状況のデータを入力し,排水処理能力に応じた変化後の浸水状況を一定期間ごとに出力する.実際の救助活動計画では洪水発生後 3 日経過した時点で作業を開始することが明記されていることから,入力データもそれに対応した浸水状況を洪水・氾濫シミュレーションの結果から選択する.排水処理モデルの計算を終えた後の浸水状況ファイルについては,救助モデルで要求されている浸水状況ファイルへと置き換えることができる.これにより,たとえば排水処理を考慮した救助戦略を検討することが可能となる.

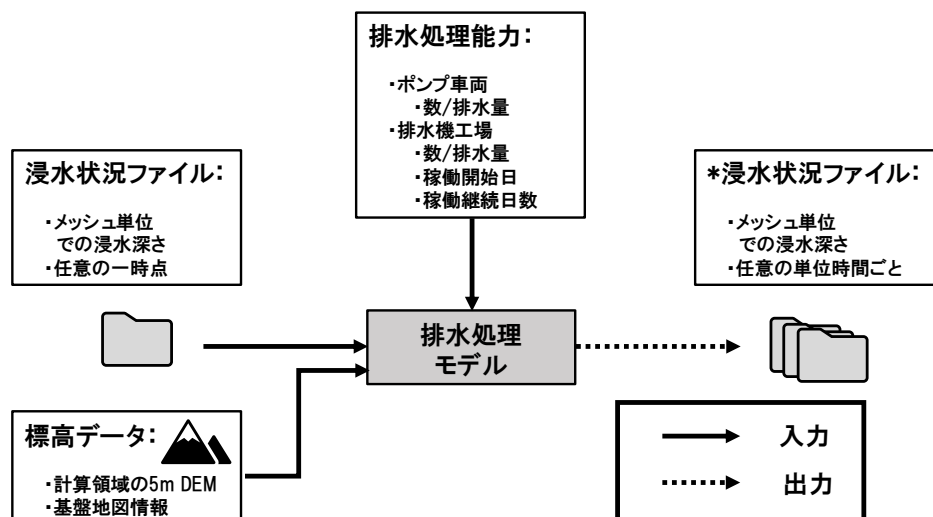


Fig.2-29 排水処理モデルの入出力関係

ここまでの個別の活動モデルは既にプラットフォーム上で用意されているものとする.これらのモデルを単一で,あるいは複数個組み合わせることにより,大規模洪水発生に向けた俯瞰的な対策を検討できる機能を構築していくこととなる.具体的な使用事例は第4,5章で述べることし,次の第3章では本プラットフォームで分析する課題を検討していく.

—参考文献—

- [1]. Nie, Y. M.: A cell-based Merchant-Nemhauser model for the system optimum dynamic traffic assignment problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.45, No. 2, pp. 329-342, 2011.
- [2]. 奥村誠, 片岡侑美子, 金進英, “津波遭遇リスクを最小化する自動車避難最適化モデル”, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 73, No. 5, I_1083-I_1092, 2017.
- [3]. 竹居広樹, 奥村誠, “歩車混合を考慮したセルベース最適津波避難モデル”, 第 37 回交通工学研究発表会論文集, pp.239-245, 2017.
- [4]. 小山維之, 篠崎喜彦, 森下信, “セルオートマトンによる群集流動の特性に基づく歩行行動のモデル化”, 日本建築学会環境系論文集, 第 78 卷, 第 691 号, pp.669-677, 2013.
- [5]. 小久保聡, 山本和弘, 山下博史, “セルオートマトンによる火災時の避難行動のシミュレーション”, 日本機械学会論文集(B 編), 74 卷, 748 号, pp.306-312, 2008.
- [6]. 畑山満則, 中居楓子, 矢守克也 “地域ごとの津波避難計画策定を支援する津波避難評価システムの開発”, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.5, pp.1498-1508, 2014.
- [7]. 内閣府, 「令和 3 年度版防災白書」 2021.
Available online: <https://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/r3.html>
- [8]. 池内幸司, 越智繁雄, 安田吾郎, 岡村次郎, 青野正志, “大規模水害時における孤立者数・孤立時間の推計とその軽減方策の効果分析”, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.3, pp.145-154, 2011.
- [9]. 江東区, 江東 5 区大規模水害ハザードマップ, Available online: <https://www.city.koto.lg.jp/057101/bosai/bosai-top/topics/20180822.html>
- [10]. 最大規模の洪水等に対応した防災・減災対策検討会, 「社会経済の壊滅的な被害の回避」に向けた取り組み～最大クラスの洪水・高潮による被害想定について～, Available online: https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000681894.pdf, 2017.
- [11]. 国土交通省近畿地方整備局: 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨災害の概要と教訓・取組事項,
Available online: https://www.kkr.mlit.go.jp/himeji/iin/kako_gensai/pdf/4kai/03_siryou11.pdf.
- [12]. 寺藤嘉宏, “江東デルタ地域における大規模水害時の救助戦略に関する研究”,
- [13]. The International River Interface Cooperative: Public Domain Flow and Morpho dynamics Software for Education and Applications, *Advances in Water Resources*, 93A, pp.62-74, 2016.

- [14]. 中央防災会議, 「大規模水害対策に関する専門調査会」:第 11 回専門調査会資料 1, 2008.
- [15]. 横山宗一郎,安藤宏恵,倉内文孝,杉浦聡志, “徒歩と自動車の混合モードにおける津波最適避難計画”, 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集, pp.2167-2174, 2016.
- [16]. 花房比佐友,小宮粹史,堀口良太,桑原雅夫, “災害時避難対策評価のための歩車錯綜シミュレーションフレームワークの構築”, 第 51 回土木計画学研究発表会・講演集, pp.882-889, 2015.
- [17]. 国土地理院, 基盤地図情報, Available online: <https://www.gsi.go.jp>
- [18]. FDMA, “Tsunami evacuation countermeasures promotion manual review meeting”, Available online: https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/kento106.html
- [19]. 花島健吾,和田洋介,堀智晴,野原大簾督, “自動車による避難行動と道路上の信号制御を考慮した水害避難行動モデル”, 京都大学防災研究所年報, 第 56 号 B, pp.667-674, 2013.
- [20]. J. Guzzi, A. Giusti, L. M. Gambardella, G. Theraulaz, G. A. Di Caro, Human-friendly Robot Navigation in Dynamic Environments, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA), pp.423-430, Karlsruhe, Germany, May 6-10, 2013.
- [21]. J. Snape, J. van den Berg, S. J. Guy, and D. Manocha, “The hybridreciprocal velocity obstacle,” IEEE Transactions on Robotics, vol. 27, no. 4, pp. 696–706, 2011
- [22]. J. van den Berg, S. J. Guy, M. Lin, and D. Manocha, “Reciprocal nbody collision avoidance,” in Robotics Research - Proceedings of the 14th International Symposium ISRR, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2011, vol. 70, pp. 3–19.
- [23]. 総務省消防庁, “洪水・津波災害等における水難救助活動マニュアル”, 2019.
Available online: https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/kento221_23_shiryo1.pdf
- [24]. 中央防災会議:「首都直下型地震避難対策等専門調査会」,2008.
- [25]. 国土交通省, “Plateau”, Available online: <https://www.mlit.go.jp/plateau/>

第3章

水害救助までの長期的な視点での避難意識アンケート

---概要---

今後救助活動の限界が叫ばれている地域においてまず現状の住民の避難意識やそれに基づく浸水域の救助活動の課題について把握することから始める。そこで長期的な浸水が想定される地域の住民が、避難を終えた後の救助活動の影響といった長期的な目線に基づく避難の意思決定ができるかを確認することとした。その避難の意識調査として避難後の救助待機期間中に関わる項目を加えた新たなアンケート調査を Web 上で実施した。回収データを分析した結果、大多数の住民が浸水想定地域から脱出しようとしないうこと、そして避難行動を決定する際に、救助活動にまで意識が届いていないことがわかった。その背景には、救助に対する期待が高く、それゆえ避難生活の負担を過小に評価してしまっていることが示唆された。また回答者に救助活動の限界に関する情報を提示したことによる救助の動向を意識した避難意識への態度変容の効果は十分に期待できないものとなった。これらの結果を踏まえ、当該地域での大規模発生時にはほとんどの住民が域外に避難しないと想定した上で救助計画を策定する必要があることが判明した。その上で長期的な視点での住民の避難行動の見直しも今後求められる。

3.1 はじめに

水害のなかでも、特に洪水・氾濫、土砂災害といった自然災害について、該当する地域の住民が避難しないという報告は枚挙にいとまがない。戸村らは、近年頻発する水害事例も含めた 1982 年から 2021 年まで既往水害 86 事例について、被災者への事後アンケートを通じた避難率を整理している[1]。この報告[1]では、避難率については 0%から 100%に近い値が示されているが、有効回答数が多い事例にだけ絞ると、10%から 70%程度のレンジで分布しており、30%の値に集中していることがわかる。

避難率の算定は、被災後の避難行動アンケートに基づくものであるため、この割合については必ずしも実態を示したもとはいいきれない。例えば、平成 30 年に発生した西日豪雨に対し、ウェザーニュースがアプリ上で実施した避難行動調査では、避難したという回答が 16%であった[2]が、避難指示対象者のうち避難所などに身を寄せた人数のデータが整う

17 市町の避難率が平均で約 4.6%であった[3]という報道もされている。データの集計方法や避難行動の定義によって、避難率の算定に違いはあるが、やはり避難率そのものは低いというのが実態である。

しかし救助活動の対象者を識別するうえでは、避難の有無だけでなく、住民が域外と域内のどちらに避難しているかという情報も重要となってくる。要救助者の発生総数を減らすためには浸水想定域外へと住民を避難させる必要がある。これは住民の避難率が低いという従来の課題に加え、より高度な避難行動を住民に要請することはこれまで以上に大きな課題となりうる。そして、厄介なことに、住民の生命を守るという観点では、避難をそもそもしないという選択も決して間違っていないのだ。例えば、岩船は 2012 年の熊本県での広域大水害時において、体力的に劣る高齢者の避難では、次善策的な避難行動が有効であるという検証をしている[4]。また、矢守も最適な避難所へのベストな避難行動ではなく、災害状況に合わせた無理のない「セカンドベスト」な避難行動を養うことが重要であると提言している[5]。いつ堤防が崩壊し、洪水が発生するかを完全に予測することは難しいこともあり、屋外を避難するという行動にも被災リスクが伴うこととなる。そのため、特に切迫した状況であり、既に安全が確保されている場所にいるならば、あえて外出するという危険な行為を避けるべきであろう。

少なくとも避難時において、まずは住民自身の安全を確保するという短期的な利益を追求してしまうことは問題がないように思える。しかし、市街地が浸水するような事態が起り得るとすれば、域外避難をしないという判断が長期的には不利になりかねない。そうした状況が想定されているにもかかわらず、あえて域外避難をしないという判断を住民がするだろうか。この点において住民の救助への期待感の高いこと、或いは救助される事態にまで意識が届いていない可能性も無視できない。災害対応においては住民を救出する主体が消防隊をはじめとした行政にあるという認識も高い[6]ことから、浸水域での救助活動においても行政に依存する傾向を示すと予測される。このことは、住民の意識下で、「救助する側(救助隊)と救助される側(住民)」という対立構造が強固に形成されていると考えられる。従来の避難意識調査では避難時における住民の避難判断を調査する事例が多いため、洪水発生を想定した場合の救助活動にどこまで住民の意識が行き届いているか確かな報告はない。ただ、仮に救助活動に対する住民の意識が希薄であるのであれば、長期的な視点での避難判断を行うことがより困難になるだろう。

昨今叫ばれている浸水域での救助活動の限界は、救助を待つ住民にとっても無視できない問題である。しかし、過去の洪水発生事例や避難意識調査から、大規模な洪水時においても当該地域の住民が避難しない可能性が高い。浸水域での救助活動には限界があることや、

そのため域内の住民が避難生活から解放されるまで長期間要することになるという事態をそもそも意識できていない可能性もある。そのため、長期的な視点による避難行動が選択できるのか、救助される可能性を考慮した避難意識が現状住民に醸成されているかどうかも把握する必要がある。

そこで本章では今後長期的な浸水が見込まれる地域に居住する住民の避難意識の実態を調査する。具体的には、洪水発生により長期的な浸水が想定された場合に、住民がどのような避難行動を選択するかについて調査していくこととした。重要な視点として、A) 避難の選択を迫られた際に、避難を終えることだけではなく、その後の救助活動を待つ間の避難生活に対し、どこまで意識が届いているか、B) 救助に対する期待がどの程度であり、また自身や他者の救助優先度をどのような配分にすべきかと検討しているか、を分析することである。

今回対象とする地域は、高層建物が多く密集する都市部の住民としている。ここまでの議論で、高層階の住民は避難しない傾向[7]があることや、都市部での住民同士のつながりが希薄である可能性があることから行政の取り組みや他の住民に配慮した避難ができない可能性がある。そのため、ここまでの議論をより深刻化する地域特性を抱えた場所であるとみなした。こうした、地方で発生事例の多い洪水による直接的な被害ではなく、むしろ住民の避難意識に基づく二次的な災害対応上の課題を都市型洪水に特徴的なリスクであると定義し住民の避難意識の調査を進めていく。

3.2 調査手順

本節では、今回の避難意識調査の概要について説明する。1 項では、調査の対象となる地域や住民の属性について整理し、調査の方法について説明する。2 項では、本意識調査で用いるアンケート項目の概要や性質について簡単にまとめる。3 項では、調査で得られた結果に対する分析方法について述べるものとする。

3.2.1 調査方法

このように膨大な数の住民を抱えるこの地域では、地域全体が長期間浸水するリスクがあり、非常時においては多数の要救助者の発生が見込まれる。また同時に、高層建物に住む住民も全体の多くを占めているため、あえて避難しないという選択が心理的に優位に働き、浸水域内での孤立住民の数を増やしてしまう。その結果として救助リソースの圧迫を助長してしまうという、本研究が対象とする問題構造を強く含む地域である。そのため、今回の調査において、問題条件に適合した地域特性を抱える市街地だと判断し、この地域に住む住民の避難意識を調査することにした。

巨大な河川を抱える当該地域においては、行政からの災害情報の発信も活発に行われて

おり、洪水氾濫時の被害想定を載せているハザードマップ [8-10]も住民に向けて配布している。このハザードマップには、想定最大降雨に基づく市街地内の浸水深さや浸水期間に関する予測マップや、行政から発信される避難警報の意味、避難場所の配置といった住民の避難判断に役立つ情報が記載されている。特に注目すべきは、避難の方法として、より高い場所への垂直避難を推奨していることである；例えば、江東デルタ地帯を構成する江東区のハザードマップには、“想定浸水深さよりも高い場所へ避難するように”とのメッセージが載せられている。

いつ河川の堤防が破壊され、市街地へ河川の水が流れ込んでくるのか分からない状況にあっては、身を危険に晒す行動を避けることが避難上重要であることは言うまでもない。そのため、建物外を移動する時間を極力短縮することや大人数での一斉避難による道路上の混雑を回避するためにも、近くの建物に避難することや、あるいはあえて避難しないという判断を促すことは、住民への重要なリスクコミュニケーションである。しかし著者らは、そうした避難行動が、避難を終えた後の救助待機フェーズにおいては、より負担を増やす行動となりうることをシミュレーションで示してきた。そこで、行政からのハザードマップに触れてきた当該地域の住民が、いざ水害の発生が想定された際に、どのような行動をとり、それはどのような判断に基づくものなのかを調査していく。

ここまでの説明を踏まえ、本調査の方法について Table.3-1 に示した。今回の調査では、独自のアンケート項目を作成し、アンケート会社を通じたパネル調査を実施した。アンケートの対象者の居住属性として、江東デルタ地帯のうち東京都の墨田区と江東区の一部地域を除いたエリアとした。回答者の年代としては、避難時に自発的な判断・行動ができる年齢であることを条件に、20歳以上の回答者を想定している。また、調査結果の想定回収数としては、当該エリアの住民のうち、調査依頼をしたアンケート会社に登録している最大回答者数

Table.3-1 避難意識調査の実施状況

アンケート概要	
調査方法	Webパネル調査
調査期間	2023年8月27日～29日
回答者数	2,400
年代	20代-70代
地域	江東デルタ内の東京都江東区・墨田区

2400人ほどを想定している。

3.2.2 アンケート内容の概要

本節では、避難意識調査におけるアンケートの内容やフローについて概説する。これまで、避難時のみに着目したアンケート調査は幾度もされてきた(例えば、本アンケートの対象地域に近い場所で調査が行われた事例もある[11])。しかし、本研究が課題意識としてもつ、避難を終えた後の避難生活や救助待機中の価値観を把握するアンケートはまだ行われていない。そのため、研究の目的に合致したアンケート項目を設け、独自のアンケートを作成することとした。今回特に、実際に水害に被災した後に行うアンケートではなく、今後発生が懸念される大規模水害の発生を想定した、被災前の意識調査であるため、慎重にアンケート項目を並べる必要がある。また、避難アンケートそのものは、Social Desirable Bias[12]が生じやすい項目であると考えられるため、本調査の狙いが可能な限り回答者に意識されないよう、アンケートのフローを考慮した[13]。同様に、Web 上での匿名回答とすることで、回答者の素直な意見を収集できるようにも配慮している[14]。

上記の内容を踏まえ、本研究で使用するアンケートのフローや大項目を Fig.3-1 に示す。以下、各大項目の内容や意図について述べる。

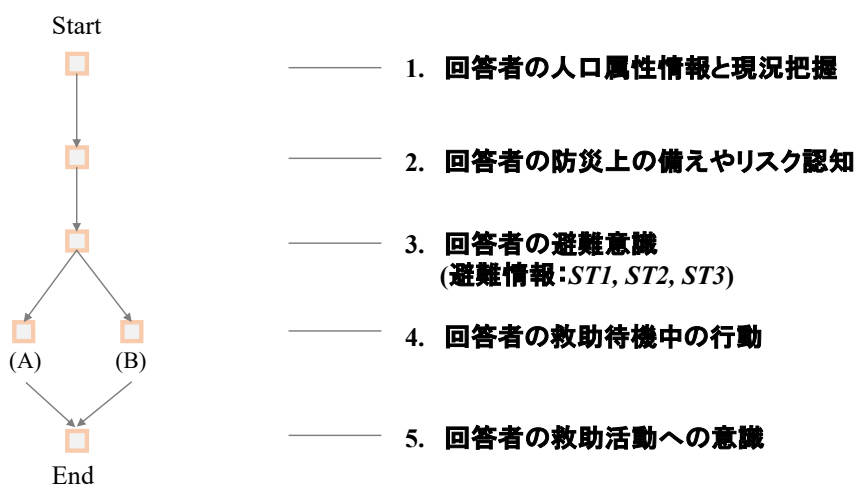


Fig.3-1 本調査の設問フローと設問内容の概要

1. 回答者の人口属性情報と現況把握

アンケートの最初に、回答者の属性や居住状況について把握する。例えば、前者であれば、回答者の年齢や居住地、同居人の有無といった内容である。また、後者では、居住している建物の構造や階数、河川からの距離といった現在の居住環境が、水害に対しどのようなリスクを抱えているかを把握する内容である。これらの情報は、後の避難時の行動判断を分析する上で重要な要因であり、また回答者の基本情報でもあることから、アンケートの初期段階に

問うこととした。

2. 回答者の防災上の備えやリスク認知

次に、回答者が日常的に抱えている水害リスクへの意識や日頃の防災活動状況について把握する。前者では、浸水の被害を受ける可能性についての主観的な判断や、行政が発する避難情報やハザードマップといった災害情報の認知や理解がどの程度及んでいるかを問う内容となっている。後者では、地域内の防災活動の実態や参加状況を問い、地域としての防災能力の程度や回答者の地域とのつながりを問う内容となっている。

ここでの問いは、水害対策への知識を十分備えているか、対策への意識の程度を把握するものであり、後の避難時の行動判断を分析する上で、適切な判断ができる回答者であるかを識別するうえで重要な要因となる。特に、水害への理解不足や防災活動への関心が低い住民は、避難時に適切な意思決定ができなくなることや、避難を諦めてしまう原因となりうる。そのため、回答者の回答への信頼度を把握する目的として、これらの問いを設定した。

3. 回答者の避難意識

ここでは、洪水発生を想定した場合に、回答者が避難時にどのような判断をするかを把握する。例えば、行政から発信される避難情報のうち、どのタイミングで避難を開始するのか、その場合どこに避難するのか、あるいは避難しないのかといった意思決定を問うものとする。また、その際に、なぜそのような判断をしたかを把握し、避難意識について回答者の実態を把握する。

今回、まだ発生していない水害への避難意識を問うアンケートであるため、災害の発生を想定したストーリーを用意した。回答者は、そのストーリーを通じて、災害状況及び行政からの情報発信を把握し、避難行動を選択していく流れとなる。ストーリーの内容は、行政からの避難情報ごとに3つの段階でストーリーが流れるものとする(ST1-3)。それぞれハザードマップに記載されている避難情報を考慮し、ST1：“高齢者等避難”，ST2：“避難指示”，ST3：“緊急安全確保”，の三段階の避難情報を反映したストーリーを回答者に提示する。それぞれのストーリーは、災害状況の激化を考慮して行政が段階的に発信する避難情報であると想定した。

さらに各ストーリーでは、避難の行動として何を選択するかを問うこととしている。その選択肢には、(1)今いる場所を離れて、避難施設や避難場所へと移動する(水平避難)、(2)今いる自宅や高層建物の上階に移動する(垂直避難)、(3)浸水想定地域外へと脱出する、(4)避難しない、に大別される。”避難しない”を選択した回答者を除き、ST1-3のどのタイミングで避難を決意するかを把握することで、避難のタイミングについても分析できるようになっている。また、避難行動の選択肢のうち、浸水域内に留まらない(3)の選択肢以外を選んだ回答

者は、その避難先に応じて以降の質問で分岐が行われる。

4. 回答者の救助待機中の行動

ここでは、3.での避難行動を終えた後の避難生活に対する回答者のイメージを把握する。その際、3.で回答した避難行動に応じて、異なったストーリーを回答者に提示し、救助を待機している状況での回答者の意識を調査する。具体的には、3.において最終的に水平避難した回答者(A)と、垂直避難・避難しなかった回答者(B)の二つに分けた。

救助活動の観点では、自宅など少数の住民が地域内で分散して救助を待機している状況よりも、避難施設に集団で避難している住民の救助を優先させた方が、迅速な救助活動を行えるという、住民の避難状況に対する救助戦略上の優劣差がシミュレーションで示されている。また、救助トリアージの発生において、長い時間待つ末に救助の順番を譲る必要もでてくるだろう。そこで、すぐそばに同じく救助を待つ他の住民がいる(A)のケースと、必ずしも目の前に他の住民の姿が見えない(B)のケースでは、救助リソースの譲り合いができるかという利他的行動についても、避難状況ごとの回答者の意識の差を把握することとする。

5. 回答者の救助活動への意識

最後に、救助を待つこととなった4.の回答者全員に対し、救助活動の方針や救助期間への期待を把握する。また、大規模水害が発生した場合に救助活動の限界が出てくること、そしてその場合には回答者自身の救助が遅れる、あるいは救助事態がされないという可能性を伝え、避難意識としてどのように変化するかを把握する。前者は、救助活動を要請する行政に対する期待や依存度を調査し、今後の水害発生時における救助リソースの圧迫リスクがどの程度あるかを見積もる上で重要な情報となる。また、後者は、都市型洪水リスクの発生について、情報の提示による行動の態度変容が起こるのかどうかを、ナッジの視点から分析する上で有用である。

3.3 避難意識の把握

この節では、実施したアンケート調査の結果を示すとともに、分析結果について説明する。まず、1 節では回答者の属性として、年代や居住状況、日頃の防災意識や洪水リスク情報への理解度を確認する。2 節では、アンケート内の洪水発生シナリオに対する回答者の避難行動判断を紹介し、その後の分析の視点を紹介する。3 節以降の各項では、避難行動とアン

ケート内の各項目との関係性についてより詳細な分析を行う

Table.3-2 回答者の生活背景の収集結果

クラス	設問項目	カテゴリー	回答数
Demogaphy	性別 (SA)	男性	1459 (60.8)
		女性	941 (39.2)
	年代 (SA)	20代	134 (5.58)
		30代	317 (13.2)
		40代	566 (23.6)
		50代	767 (32.0)
		60代	432 (18.0)
		70代	184 (7.8)
	住まい (SA)	1戸建て(平屋)	19 (0.8)
		1戸建て(2階以上)	378 (15.8)
		マンション・アパート(1階に居住)	98 (4.1)
		マンション・アパート(2階に居住)	273 (11.4)
		マンション・アパート(3階以上に居住)	1588 (66.2)
その他		44 (1.8)	
Preparedness	日常的な防災の備え (MA)	飲料水・食糧の備蓄	1406 (58.6)
		避難場所、経路の確認	899 (37.5)
		近隣の指定避難所までの避難経路の検討	387 (16.1)
		市区町村の登録制メールの登録	201 (8.4)
		家族との連絡方法の確認	514 (21.4)
		非常用持出品の準備	810 (33.8)
		地域の自主防災活動や消防団への参加	83(3.5)
		その他	31 (1.3)
		特に何もしていない	724 (30.2)
		防災活動への参加状況 (SA)	毎回参加している
	時々参加している		437 (18.2)
	1度参加したことがある		325 (13.5)
	参加したことはない		1562 (65.1)
	地域とのつながり (SA)	積極的に自治会等の地域活動に参加したり、親しく話したりしている	169 (7.0)
		一斉清掃の参加や当番制の役割を行っている	165 (6.9)
		高齢者・障害者や子育て支援に参加している	40 (1.7)
		愚痴を言えるような友人が近所にいる	149 (6.2)
		挨拶をする程度	1197 (49.9)
		ほとんど付き合いがない	801 (33.4)
	地域の取り組みへの理解 (MA)	自治会等の地域で防災に関する取り決めがある	391(16.3)
		自治会等の地域で防災に関する取り決めのため、数回会合がある	183 (7.6)
自治会等の地域で、高齢者・障害者などに関する取り決めがある		120 (5.0)	
自治会等の地域で取り決めはない		147 (6.1)	
自治会等の地域で取り決めがあるかどうか知らない		1479 (61.6)	
その他		208 (8.7)	

クラス	設問項目	カテゴリー	回答数
Knowledge	大雨特別警報の意味 (SA)	知っている	1570 (65.4)
		今初めて知った	830 (34.6)
	洪水危険度分布図について (SA)	知っている	1351 (56.3)
		今初めて知った	1049 (43.7)
	避難に関する情報の違い (SA)	知っている	1318 (54.9)
		今初めて知った	1082 (45.1)
	警戒レベルの内容・違い (SA)	知っている	1405 (58.5)
		今初めて知った	995 (41.5)
	洪水・土砂災害ハザードマップ (SA)	見たことがある	1910 (79.6)
		今初めて知った	490 (20.4)
Risk			
Awareness	想定浸水区域内 (SA)	浸水想定区域(浸水深:3m以上)にある	362 (15.1)
		浸水想定区域(浸水深:0.5~3m)にある	631 (26.3)
		浸水想定区域(浸水深:0.5m以下)にある	290 (12.1)
		浸水想定区域ではない	241 (10.0)
		対象河川が近くに無く、浸水想定区域が設定されていない	29 (1.2)
		わからない	847 (35.3)
	自宅は安全な場所にあるか (SA)	安全な場所にある	790 (32.9)
		安全な場所ではない	844 (35.2)
	風水害の被害を受ける危険性 (SA)	ありえない(0%)と考えている	163 (6.8)
		可能性は低い(1~30%)と考えている	960 (40.0)
可能性はある程度ある(31~69%)と考えている		899 (37.5)	
可能性は高い(70~99%)と考えている		233 (9.7)	
必ず被害を受ける(100%)と考えている	145 (6.0)		
Evacuation			
Decision	避難行動の選択	垂直避難	659 (27.5)
		水平避難	955 (39.8)
		域外避難	123 (5.1)
		避難しない	663 (27.6)
		避難開始タイミング	
	避難開始タイミング	高齢者等避難 (Level 3)	1392 (58.0)
		避難指示 (Level 4)	254 (10.6)
		緊急安全確保 (Level 5)	121 (5.0)
		避難しない	633 (26.4)

3.3.1 回答者の背景

本節では、回答者の回答背景の要因ともなりうる各種属性情報について説明していく (Table.3-2)。なお、アンケート項目の全てを結果として提示することはせず、本研究の分析で有用と思われる項目だけを説明していることにご留意いただきたい。

まず、回答者の年代に着目すると、40-50代といった自力避難が可能な年代を中心に、より高齢な回答者や若い年代の回答者といった幅広い年代の結果を収集した。次に、回答者の居住状況について、回答者の大多数が3階以上の高さに住んでいた。これは高層建物が多くあ

り、そこに居住する住民も多いという日本の中心都市である東京の地理特性を再現した収集結果となったと判断できる。大規模水害時の発生では、1 階レベルの場所は浸水に飲み込まれ、場所によっては 2 階レベルも床下浸水の危険性が出てくる。そのため、3 階以上の高さに住む住民だけが避難を必要としない住民であるものとして想定している。自宅の場所がどの程度浸水の可能性があるのかどうかは、回答者が避難行動を判断する際の重要な検討項目となっていると考えられる。こうした自宅の安全性への依存が、回答者の避難判断に大きな影響を与えているとすれば、本研究で述べる都市型水害リスクを構成する地理特性としての評価ができると想定される。

次に、回答者の防災に関する日頃の取り組みや近所付き合いについて把握する。質問項目としては、近所付き合いの度合いや日頃の防災の備え、地域の防災活動への参加状況、地域の取り組みの把握の有無である。Table.3-2 の示した結果によると、大多数が地域の防災活動への参加経験が少なく、また近所付き合いも少ない。個人レベルの防災の備えとしては、食料や飲料の備蓄、避難場所の確認といった対策がされていた。これらの要素は、住民個人ごとの防災意識に関わる内容であり、避難の意思決定にも影響を与えうる。回答者の防災に対する意識や真剣度を把握するための項目として設けた。

最後に、回答者の防災知識として、洪水リスクに関わる情報への理解度を把握することとする。洪水に関する情報としては、行政から発信される警報情報や内容、ハザードマップについて認知しているか、あるいは内容に対する正しい認識は、避難時における安全な避難判断につながる。また、こうした知識背景により、住民の避難判断に影響を与えうるとも考えられる。さらに、情報そのものの新しさも重要な観点である。日本では、過去の災害の経験を受けて、災害に関する情報が幾度も刷新されてきた。そのため、住民側としても新しい災害情報を身につけていなければ、行政とのリスクコミュニケーションが適切に機能しなくなる可能性がある。そのため、回答者がしっかり最新の災害状況を備えているかを把握した。

本アンケートでは、洪水に関する知識として、(A)大雨特別警報、(B)洪水危険度分布、(C)避難情報の危険度、(D)警戒レベル、(E)洪水ハザードマップ、の 5 つの項目について回答者に訊ねた。結果としては、(A)-(D)の項目については、約 55%の回答者が、内容を理解しているとの回答をした。また、(E)のハザードマップについては、前の項目よりも多い、約 80%の回答者が、その内容を見たことがあると回答した。これらの収集結果について、回答者の知識やその新しさについて、より細かく分析していく。

Fig.A-1 に、(A)-(E)の質問項目間での、回答者の回答傾向について、クロス分割表に基づくクラメール連関係数の値を示した。Fig.A-1 によれば、全体的な回答傾向として、項目内容の理解の有無が項目間で関係性があることを示している。具体的位は、Table.A-1 に示すように、

すべての項目を知っているか、逆にすべての項目を理解していないかの知識ギャップが回答者のなかで目立っていた。また、どの回答パターンにおいても、(E)のハザードマップを知っている回答者が多いことも注目すべきである。ハザードマップについては、ここ10年の間に幾度も情報が更新されてきた経緯がある。そのため、ハザードマップを見たことがある回答者が一体どの時点の災害情報を把握しているのかをアンケート上で確認した。

Fig.A-2 に回答者の回答結果を示した。Fig.A-2 の内容のうち、“Answer Content” は質問項目内の選択肢内容を示し、“Event No.” は日本国内で行われたハザードマップ関連の情報更新イベントのタイミングを表し、“Answer Rate” は選択肢ごとの回答率を示している。“Event No.” については、本調査の開始時期を起点に、過去の各更新日時を、“Answer Content” との時系列関係を考慮して配置している。また、イベントの具体的な内容については、Table.A-2 に示した。

イベントのうち重要なものとしては、E4 の荒川水域のハザードマップの更新や E6 のハザードマップの避難情報の表記が改訂された出来事である。前者は、浸水範囲や浸水深さといった被害リスクの想定が変化したという点で、住民のリスク認識にとって重要な変化である。後者は、行政から発信される情報に対する住民の理解及び避難行動トリガーの効き方に影響を与えうる出来事である。その観点を考慮すると、最大で約90%の回答者が、最新の被災予測マップを見ており、加えて全体の約56%の回答者が最新の避難情報の内容を見たことがあるという結果であることがわかる。この結果では回答者の大多数が、最新の情報に触れており、現状の被災リスクに対する知識がインプットされているとみなせる。

最後に回答者が最終的に選択した避難行動を説明する。避難行動としては、(A)垂直避難：自宅の上階やマンションの高層階などの高さ方向への避難、(B)水平避難：避難所や避難場所など、今いる場所や建物を離れて、屋外を移動する避難、(C)域外避難：浸水想定地域外への脱出、(D)非避難：その場から避難しない、という選択肢に大別している。また、今回のアンケートでは、避難行動の選択とともに、その判断のタイミングについても回答してもらっている。判断のタイミングは、3章で述べた行政からの避難情報をもとに、ST1：“高齢者等避難”，ST2：“避難指示”，ST3：“緊急安全確保”，の3度のチャンスがあるものとした。ST1 から回答者に避難の有無を判断してもらい、ST3 に至るまでに”避難しない”以外の選択をした場合には、その判断を回答者がとる避難行動であるとした。また、ST3 まで常に”避難しない”を選択した回答者は、避難しないという判断をしたものとして扱った。

さて、Table.3-2 によれば、約27%の回答者が垂直避難を、約40%の回答者が水平避難を、約5%の回答者が域外避難を、そして残りの約27%の回答者が避難しないことを選択している。後に浸水域での救助活動が行われることを想定すれば、垂直避難や避難していない、約54%

の回答者が各建物で孤立する状況となり、水平避難を選択した全体の半分の回答者が集団で避難生活を行うこととなる。そして、救助を待機することがない状況となったのは、域外避難を選択した全体のたった約5%の回答者であった。そのため、今回の回答結果を参考にすれば、この地域のほとんどの住民が域外に避難せず、浸水域にとどまってしまうという事態になることがわかる。ここからは、回答者が答えた避難時の避難判断を中心に、その判断の背景にどのような項目が関係しているのかを分析していく。そのためにも、まず次の2節では、アンケート分析を進めていく上で助けとなる分析手法を導入し、どのような質問項目に焦点を当てるべきかを説明する。

3.3.2 数量化2類

本アンケートの目的は、長期浸水を想定した洪水避難シナリオに対し、都会に住む住民の避難意識を調査することである。それに加え、避難を終えた後の救助活動を含めた長期的な視点にたった避難意識を住民が抱けているのかを分析し、またその結果を踏まえ、避難行動の変容に必要な対策を議論することである。そのため、まず住民の避難行動の判断には、どのような背景があるのか、アンケート内の他の質問項目から推察することが重要である。改善すべき避難行動をとる住民の回答結果、共通の回答傾向を見出すことができれば、対策の方向性に関する知見を得ることにつながる。そのため、アンケート内の各質問項目と、回答者の避難判断の関連性について詳しく分析していくこととする。

従来より、アンケートのようなカテゴリーデータに対する関連性の分析には、クロス分割表を用いた独立性の検定などを実施することが一般である。他方、アンケート内の項目が多数ある場合、個々のクロス分割表を作成することには限界があることや、人の手で探索的に調査する場合には、ある項目間の関係性を見落とすことにもつながりかねない。そのため、数量化2類[15-17]と呼ばれる統計手法を導入し、回答者の避難行動判断に相対的に強い影響を与えている質問項目を抽出し、その項目に焦点を当てて分析を進めていく。

数量化2類とは、カテゴリカルな説明変数と目的変数の関係性を分析する手法であり、判別分析をカテゴリカルな変数同士の予測に置き換えたものとして認識してよい。具体的な手法の説明は省くが、数量化2類で得られる結果は、従来の判別分析の手法において、カテゴリカルな説明変数をダミー化し、0-1の数値情報を持つ変数に置き換えて分析した結果と同じになることがわかっている。数量化2類を使用するメリットとして、特に目的変数が2群に分けられている場合には、説明変数ごとにカテゴリースコアと呼ばれる判別式上の影響度を示した数値を算出することができる。また、各質問項目に、2群のどちらに振りわけの要因になっているかを可視化することも可能である。避難意識調査の分析に用いられた事例も存在しており、アンケートによる調査結果の分析手法として有用である[18]。

Table.3-3 に本アンケートの数量化2類の分析結果を示す. ここでは, 回答項目ごとのカテ

Table.3-3 数量化2類の実行結果

説明変数	カテゴリー	スコア			レンジ	偏相関係数
		-1.0	0.0	1.0		
居住場所 (SA)	戸建て・マンション・アパート(1,2階)		0.262		0.453	0.115
	マンション・アパート(3階以上)	-0.133				
	その他		0.320			
年代 (SA)	20代		0.188		0.432	0.082
	30代		0.169			
	40代		0.066			
	50代		0.020			
	60代	-0.191				
想定浸水区域内 (SA)	70代	-0.244			0.289	0.069
	浸水想定区域(浸水深・3m以上)にある		0.113			
	浸水想定区域(浸水深・0.5~3m)にある	-0.156				
	浸水想定区域(浸水深・0.5m以下)にある	-0.049				
	浸水想定区域ではない	-0.081				
風水害の被害を受ける危険性 (SA)	対象河川が近くに無く、浸水想定区域が設定されていない		0.133		0.451	0.085
	わからない		0.104			
	ありえない(0%)と考えている	-0.170				
	可能性は低い(1~30%)と考えている	-0.114				
	可能性はある程度ある(31~69%)と考えている		0.043			
避難行動の判断材料 (RA)	可能性は高い(70~99%)と考えている		0.276		4.146	0.308
	必ず被害を受ける(100%)と考えている		0.281			
	避難先までの距離		0.767			
	自宅	-0.513				
	避難先と河川との近さ		0.404			
	避難経路の安全性・危険性		0.228			
	避難先での避難生活の負担	-0.328				
	救助を含め避難生活からの解放までの見込み時間		0.085			
	洪水発生までの猶予時間	0.000				
	家族や知り合いの存在		0.673			
避難生活で不安なこと (RA)	浸水範囲の見込み	-0.425			1.407	0.099
	その他					
	トイレ・風呂といった衛生面の不安	-0.097				
	飲料水の供給		0.239			
	電気などのインフラの存在	-0.032				
	窮屈な生活	-0.059				
	孤独を感じる		0.683			
共同生活でのコミュニケーション		0.244				
救助方針への要望 (RA)	特になし	-0.495			0.782	0.143
	その他	-0.724				
	避難施設など沢山の人が集合している場所を優先する		0.496			
	高齢者や子供などを優先する	-0.057				
	浸水域の外縁に近い場所から順に		0.451			
	浸水域の中心部に近い場所から順に		0.024			
より早い救助が見込める場所は? (SA)	救助部隊が発見した住民から手当たり次第に	-0.208			0.399	0.093
	部隊の方針に任せる	-0.286				
	自宅やマンションなど、集団から孤立している避難者を優先	-0.019				
避難生活の負担がより少ないのは? (SA)	避難施設		0.150		0.409	0.103
	それ以外の建物(自宅等)	-0.036				
救助されるまで耐えられる期間 (SA)	同じ程度の時間	-0.249			0.645	0.073
	避難施設		0.289			
	それ以外の建物(自宅等)	-0.120				
	同じ程度の時間	-0.025				
	1日以内		0.253			
	3日以内	-0.018				
	5日以内	-0.015				
救助が遅れる可能性 (SA)	7日以内	-0.042			0.116	0.024
	10日以内	-0.150				
	14日以内	-0.093				
	14日以上	-0.392				
	知っている		0.060			
救助活動の限界 (SA)	知らない	-0.055			0.105	0.019
	知っている		0.051			
救助活動中救助できない可能性(SA)	知らない	-0.054			0.157	0.034
	知っている	-0.066				
相関比		0.284				

ゴリースコアのレンズと、判別における重要度を示す偏相関係数を用いて、質問項目という大きな括りで、回答者の避難判断のうち、避難の有無に影響を与えている項目を抽出している。注意として、相関比は数量化2類を通して学習する予測モデルの説明力を示しており、最大で1.0までの値をとる。この観点でいえば、今回の数量化2類の分析では、必ずしも予測モデルとしての十分な説明力は持っていないと判断している。そのため、予測モデルとしての活用ではなく、あくまでも注目すべき質問項目を探索するという用途に限定した。

さて、ここからの分析のアプローチとしては、Table.3-3の結果を参照し、偏相関係数が比較的大きな質問項目を、回答者の避難判断上の有力な説明変数であるとみなし、表内の網掛け部分の質問項目を分析対象とした。具体的には、年齢や居住建物といった回答者の属性や、避難時における不安や検討材料、そして避難を終えた後の救助に対する意識であった。次の3項では、引き続き回答者の属性や避難時における意識を踏まえた分析を行う。救助に関する分析は、本稿の重要な視点であるため、次項に分けて別のトピックとして説明することとする。

3.3.3 避難意識に関する回答項目の関連分析

(a) 居住状況、年代、リスク認識

まず、回答者の居住建物と避難行動の関係性について分析する。Table.3-4に、回答者の居住パターンと避難行動に関する分割表を示した。今回、2階レベル以下の高さに居住する住民については、同じ居住パターンとして扱っている。その理由としては、浸水深さを想定すれば、2階という高さであっても浸水する可能性があり、浸水の危険性がほとんどない3階以上の居住者とは区別できると判断したこと、また分析の過程で2階以下の建物をまとめてしまうことで、クramerの連関係数が改善するということが分析作業全体を通じて経験したためである。そのため、回答者の意識としても、2階レベル以下の居住状況では、同じ被災リスクを抱えているという前提とした。

Table.3-4をみると、低層階に住む回答者のほとんどが避難をするという判断をしている。一方で、共同住宅の3階以上に住む回答者の中には、あえて避難しないという判断が優位になっていることがわかる。どちらの居住パターンともに、垂直避難と水平避難を判断した回答者数に大きな差が見られないことから、居住パターンだけではこれらの判断の区別がうまくできず、連関係数も低くなったと判断できる。しかし、分割表をみると、中高層階に住むことが、避難しないという判断をすることにつながっている可能性を見てとれる。

この点について、Table.A-3にて説明を追加すると、居住環境と被災リスクの関係性も影響していると思われる。ここでは、回答者に、現在の居住場所が直接的な洪水被害を受ける確率について主観的な確率を答えてもらっている。それらの結果と居住パターンを調査する

と、中高層階に住む回答者の危機意識が、それ以外の回答者よりも比較的低くなっていることがわかる。こうした結果を踏まえると、直接的に浸水しない場所にいる回答者にとって、すでに安全が確保されているという認識が、避難しなくともよいという判断につながっていることを示唆している。

Table.3-4 回答者の避難行動パターンごとの詳細分析

設問項目	カテゴリー	避難行動				クラス メル連 関係数	P値
		垂直避難 (n=659)	水平避難 (n=955)	域外避難 (n=123)	避難しない (n=663)		
居住状況							
n=768	戸建て・マンション・アパート(1,2階)	259	380	49	80	0.189	<0.01
n=1588	マンション・アパート(3階以上)	391	553	72	572		
n=44	その他	9	22	2	11		
年代							
n=124	20代	32	75	7	20	0.101	<0.01
n=317	30代	68	155	21	72		
n=566	40代	145	230	43	148		
n=767	50代	199	303	32	233		
n=432	60代	144	142	18	128		
n=184	70代	71	50	2	61		
避難行動の判断材料							
(1)	避難先までの距離	2	1	2	2	順位	-
(2)	自宅	1	2	1	1		
(3)	避難先と河川との近さ	7	4	5	6		
(4)	避難経路の安全性・危険性	3	3	3	3		
(5)	避難先での避難生活の負担	5	5	6	5		
(6)	救助を含め避難生活からの解放までの見込み時間	9	9	9	9		
(7)	洪水発生までの猶予時間	6	6	4	7		
(8)	家族や知り合いの存在	8	7	7	8		
(9)	浸水範囲の見込み	4	8	8	4		
(10)	その他	10	10	10	10		
避難生活で不安なこと							
(1)	トイレ・風呂といった衛生面の不安	1	1	1	1	順位	-
(2)	飲食料の供給	2	2	2	2		
(3)	電気などのインフラの存在	3	3	3	3		
(4)	窮屈な生活	4	4	4	4		
(5)	孤独を感じる	7	6	7	7		
(6)	共同生活でのコミュニケーション	5	5	5	5		
(7)	特になし	6	7	6	6		
(8)	その他	8	8	8	8		
救助方針への要望							
(1)	避難施設など沢山の人が集合している場所を優先	5	2	4	3	順位	-
(2)	高齢者や子供などを優先する	1	1	1	1		
(3)	浸水域の外縁に近い場所から順に	6	5	6	6		
(4)	浸水域の中心部に近い場所から順に	3	4	3	4		
(5)	救助部隊が発見した住民から手当たり次第に	7	7	7	7		
(6)	部隊の方針に任せる	2	3	2	2		
(7)	自宅やマンションなど、集団から孤立している避難者を優先	4	6	5	5		

別の観点として、回答者の地理的な位置が避難行動に影響をあたえているかどうかを分析した。Fig.A-3 に、回答者の居住地ごとに、避難行動の結果を可視化している。今回の調査をはじめ、この江東デルタの洪水氾濫で危険視されている河川は、Fig.A-3 の東側にある荒川である。そのため、避難行動を決定する際には、荒川を横断しない避難経路を選択すべきで

あり、結果として荒川から遠ざかるように、域外避難や水平避難を実施することが住民に求められている。その点を考慮すると、荒川との位置関係から、特定の避難行動が優位になるという強い関連性はでなかった。ここで重要な点としては、域外避難への移動コストが少ないエリアの西側に住む回答者のなかで、域外避難が優位な選択になっていないことである。さらに、その回答者が、避難しないという選択を強くとっているわけでもないことから、域外避難という認識がエリア全体で薄い可能性がある。

最後に、回答者の年齢と避難行動の関連性について、全体的な傾向として、若い年代ほど屋外を移動する水平避難を選び、高齢であるほど自宅や上階への移動といった、その場を離れずに済む行動を選んでいった。高齢者にとっては、自宅外や避難場所へ移動することの負担が大きいことから、負担なく避難を完遂できる行動を選んだのではないかと推察した。

(b) 避難行動の判断材料

ここまでは、回答者の置かれた環境や日常生活での危機意識から、回答者が選択した避難行動の要因を分析した。ここからは、回答者に避難行動の選択時に判断したことを直接質問し、回答者の判断基準について分析していく。質問では、回答者に避難行動の判断時において重視したものを、Table.3-4にある選択肢のなかから上位3つまで答えてもらっている。回答者の選択結果に、1から3位の順に小さくなるよう各選択肢に重みをかけ、それらの総合点を算出することで、選択肢ごとに全ての選択肢間で重要性を比較できるようにしている。

Table.3-4をみると、どの避難行動パターンであっても、(2)自宅や(1)避難所までの距離、(4)避難経路の安全性・危険性、を上位に選択する傾向が見られた。避難行動を検討するうえでは、まずは移動の負担や心理的な安心感から、自宅にとどまれるかという判断が重視されていることがわかる。同時に避難施設までの距離や経路を踏まえ、避難できると検討した場合は、その場を離れるという判断をしているものと思われる。これらの自宅に留まるコストとベネフィット、そして避難所に向かうコストとベネフィットの力関係から、避難行動が決定されているといえる。特に、(2)自宅よりも(1)避難所までの距離を上位にあげている、水平避難をとった回答者にとっては、自宅を離れることの方が利益に感じていたことが、Table.3-4からわかる。

次に、(3)避難施設と河川の距離、(9)浸水範囲の想定、(7)洪水到達までの猶予時間についても考察する。これらの項目は、特に屋外への避難を検討する際に考慮すべき要素である。その観点では、水平避難や域外避難といった判断をした回答者は、(3)避難施設と河川の距離、をより上位に検討し、また(9)浸水範囲の想定、についてはより下位に選んでいる。逆に、垂直避難や非避難といった、屋外避難を避ける判断をした回答者は、全く逆の順位づけをしていることがわかる。これから、屋外避難をする回答者は、そもそも今いる場所が浸水するとい

う前提で、より安全な避難施設を選ぼうとしていることがわかる。特に、屋外避難のうち、域外避難の回答者は、洪水到達までの猶予時間に意識を向けていることがわかる。他方、屋内避難の回答者は、今いる場所が浸水範囲に入っていないか、入っていても安全だと考え、屋外への避難をそもそも検討していないとの傾向があるのではと考えられる。

最後に、(6)救助を含めた避難生活からの解放時間についてはより注目しておく必要がある。本研究の主な調査目的として、住民が避難行動を検討する際に、避難時だけでなく、その後の救助活動を待つ間の負担を含めた、長期的な視点に基づく判断ができてきているかを調べることである。そのため、この避難行動を回答するまでの間、回答者に対して救助活動に関する注意付けを一切行わずにきた。これにより、回答者が普段抱いている避難意識を素直に聞き出そうというアンケートとしていた。その結果、(6)の順位がほとんど最下位であったことから、避難を終えたあとの状態に対する意識が及んでいない、あるいは重視していないことがわかった。救助に対する意識については、後述する4節でより詳細に分析するが、この質問からは、避難を検討する際には、まず避難を無事に終わられるか、いかに早く安全を確保できるかという短期的な視点で判断されていることがわかる。

(c) 避難生活に対する不安

最後に、回答者の避難生活への不安についても調査した。(b)で見てきたように、避難するかどうか、そしてどのように避難するかどうか、を判断するうえでは、安心を確保でき、そして避難者の要求を満たせる行動となるかが重要である。その観点でいえば、避難生活に対する意識から、避難施設に対する期待あるいは不安の存在を調査することで、避難行動の判断理由をよりクリアにできる可能性がある。そこで、(b)と同様に、回答者には避難生活に対する不安について、Table.3-4にある選択肢のなかから、上位3つまで答えてもらっている。

Table.3-4の結果をみると、避難行動パターンごとに、避難生活への不安内容に差がほとんど見られなかった。どれも上位に上げている項目として、飲食料や電気・ガス、衛生面といった必要最低限の生活環境を確保したいという内容が集まった。この結果を踏まえると、(b)の最後に述べたように、避難時の意思決定においては、まず安全・安心を確保できる場所であるかに意識が向いていると推察できる。

ここまでの分析は、避難行動を決定する上で、回答者が重視している内容を調べてきた。結果として、避難時においては、避難を終えることに特に強い意識が向いていた。またその後の避難生活においても最低限の生活要求しか見られなかったことから、短期的な視点での判断となってしまうことがわかる。これは、本研究の最大の問題認識である、避難時における長期的な視点での判断が不足しているという点を如実に表している。次の5章では、質問の対象を避難生活中の救助活動へのシフトし、回答者の救助活動に対する考えにつ

いて分析していく。

3.4 救助活動に対する住民の意識

前節に引き続き、回答者の救助活動に対する意識を分析していく。本アンケート内では、救助活動に関する質問項目を、回答者のそれまでの避難行動の判断に応じて変えるといった質問フローとなっている。これまでの著者らの研究の内容を参照し、救助活動を待つ間の避難生活の過ごし方として、(a)避難所などといった、住民が集団で避難している状態、(b)自宅などといった、各住民が個々に、あるいは少人数で孤立してしまっている状態、の二つに分けている。それぞれ避難生活上の負担の種類や度合いが異なり、特に救助活動の面では、自宅に留まっている住民には不利な条件になるとしている。

こうした観点から、救助に関する質問項目では、回答者の避難判断の結果、前者(a)に対応する(A)水平避難をした回答者と、後者(b)に対応する(B)垂直避難や非避難を選択した回答者に分けた。それぞれのグループでは、浸水域内で救助を待つ間の避難生活をイメージしながら、特定の質問に答えてもらった。例えば、救助リソースが不足することを受け、救助ボートの譲り合いについて、回答者自身はどうか、あるいは他の住民はどうか、と思うかなど、を質問している。域外避難を選択した回答者は、実際にはボートでの救助活動の対象にならないため、これらの項目については尋ねないでいた。

その他、全回答者に対して、避難場所ごとに避難生活の負担度合いや救助にかかる日数に差があると思うか、を問いたり、救助活動の方針に対する要望や、救助されるまでの期待日数を調査している。アンケートの最後には、救助活動の限界に関する情報を提示し、改めて今後大規模洪水が発生した場合にどのような避難行動をとりたいか、を尋ねている。前章で分かったように、現状の避難意識として救助に対する回答者の意識が薄い。そのため、救助に対する知識を強化する質問を含め、そのことを意識しながら避難行動について検討してもらうこととした。

3.4.1 救助に対する期待

回答者自身が救助活動の方針や救助されるまでの日数に対し、どのような期待や認識を抱いているか分析していく。

まずは、救助されるまでの日数としてどの程度の期間を回答者が期待しているかを Fig.3-2 に示す。Fig.3-2 では、救助されるまでの期間に対し、回答者全体でどのような回答をしたかを表しており、また前章の避難行動パターンごとに集計したものである。データを俯瞰すれば、回答者全体が3日以内、長くとも1週間以内には救助部隊によって救出され、避難生活から解放されるものとして期待していることがわかる。回答者が生活しているこの江東デルタ地帯の行政が発表しているハザードマップでは、当該エリア全体の半分ほどの範囲で2週

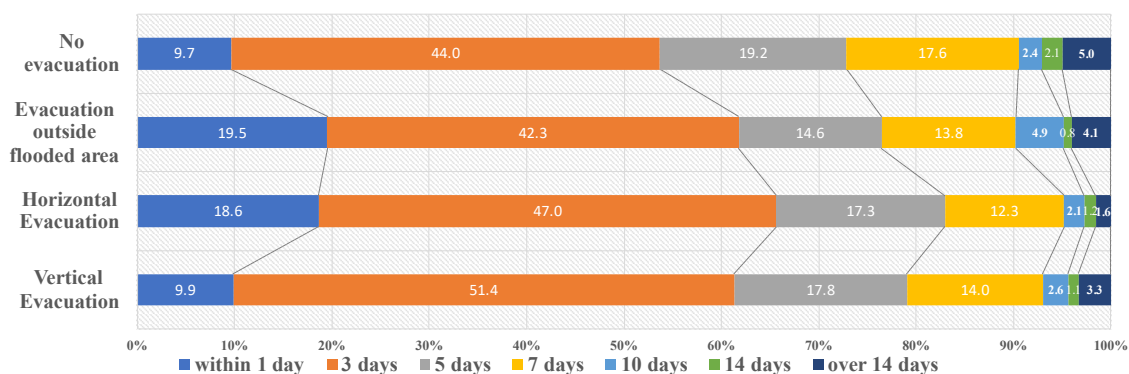


Fig.3-2 避難行動パターン別救助期間の期待日数

間以上の浸水期間が見込まれるとしている。もちろん、救出にどの程度に日程を要するかという情報は記載されていないが、シミュレーションを用いた予測では、二週間を超える期間が救助活動に必要なだということもわかっている。このような発表がなされているにも関わらず、回答者の認識として短期間で救出がされることを期待しているという現状に、ギャップを感じさせるものであった。

その他、避難行動パターンごとの救助日数を比較すると、避難施設への水平避難を選択した回答者による期待は、他の行動パターンの回答者よりも比較的短くなった。この結果そのものは、まだ救助への認識が少ない段階で回答者から引き出した避難行動結果であるため、避難行動パターンごとの差が大きくないことには注意が必要である。しかしながら、救助を待つという視点では、あえて自宅を離れて避難することを選んだ回答者にとって、より安全な状態の希求度合いが大きくなっているとも解釈できる。この点については、Fig.A-4,A-5の結果も踏まえて補足していく。

Fig.A-4,A-5ではそれぞれ、(i)避難施設に集合した住民とそれ以外の場所に滞在している住民のどちらが早く救助されると思うか?、(ii)避難施設に集合した住民とそれ以外の場所に滞在している住民のどちらの方が避難生活の負担が少ないと思うか?、という質問に対する回答を、避難行動パターンごとに集計したものである。(i)については、水平避難を選択した回答者は、同じく避難施設に集合している住民の方が早く救助されるという判断を強くもっていることがわかる。その他の回答者は、意見が分かると同時に、判断ができなかったという回答も多い。引き続き(ii)については、全体的には自宅を含む避難施設以外での避難生活の方が負担という判断をしていた。やはり、日常的に生活している空間に対する安心感が強く反映されていると考えられる。また、この問いにおいても、水平避難を選択した回答者では、避難施設にいるほうが負担を少なくできると判断する勢力が比較的大きくなっていた。このデータを考慮すると、特に水平避難を選択した回答者にとっては、救助に対する期

待が大きいことがわかる。

最後に、救助戦略・方針に対する回答者の要望を Table.3-4 に集計している。この質問では、浸水域でのボート救助活動の方針として、Table.3-4 の下部にある選択肢のどれであって欲しいかを、上位 2 位まで回答者に答えてもらっている。各回答結果に順位ごとの重みづけを行い、選択肢全体の選択順位を算出した。この結果では、回答者全体で、(2)高齢者や子供の救助を優先することを希望し、次に(6)救助部隊に方針を任せる、ことを重視していた。また、(4)のように浸水域での孤立状態が厳しい場所への救助を優先している。その逆に、(5)のような計画性のない救助の評価が低いことから、救助部隊に対して明確な方針をとった行動を期待していることがわかる。

これらの結果は、一見救助中の住民間のガバナンスが確保されているように受け取ることも可能であるが、他の順位の項目も踏まえて俯瞰的に判断するべきであろう。例えば、水平避難を選択した回答者が(1)の大多数が集合している場所からの救助を上位にあげていることや、垂直避難を選択した回答者が、(7)の孤立している住民の救助を比較的上位にあげていることから、自身の救助が優先されることを期待している部分もあると考える。もちろん、浸水域からの早期の解放を期待することは、要救助者として当然の要求であるが、ここでは回答者が必ずしも利他的な行動をとっているというわけではないという事実には注意が必要である。

3.4.2 住民の相互関係性

この節では、回答者間の救助リソースの譲り合いがどの程度生じるかを考察する。現状、大規模な洪水の発生によって、大多数の要救助者が発生すると見込まれた場合、救助リソースが不足することが懸念されている。その場合、救助活動としては、高齢者や子供、要医療者など、迅速な救助を特に必要とする住民を優先的に対処するという計画を検討することとなる。そして、その場合、健常者や域外への自立避難ができているはずの住民については、救助を遅らせることとなる。また、住民自身も救助の順番を譲るといった配慮が求められてくる。しかし、劣悪な環境で避難生活をしている住民にとって、自身が助かるタイミングを遅らせるという判断は、決して自身の利益につながらないことから、実態としては救助を譲るという判断が優位になることは少ないと想定できる。

その実態を調査するために、本アンケートでは、浸水域での救助の順番に対する意識を把握する質問を用意した。この質問に関しては、本章の冒頭で述べたように、回答者が選択した避難行動を参考に、(A)自宅などといった、各住民が個々に、あるいは少人数で孤立してしまっている状態、(B)避難所などといった、住民が集団で避難している状態、に分けて分析することとした。その理由として、まず避難施設と自宅では、救助待つ間の負担度合いが異な

ると考えられる。そして次に、集団で避難しているか、周囲に他人がいないかという状況の違いにより、他者という外部性が回答者の主張をある程度抑制するという期待があったからである。これらの理由により、域内に留まる判断をした回答者を二つのグループに分けて分析した。

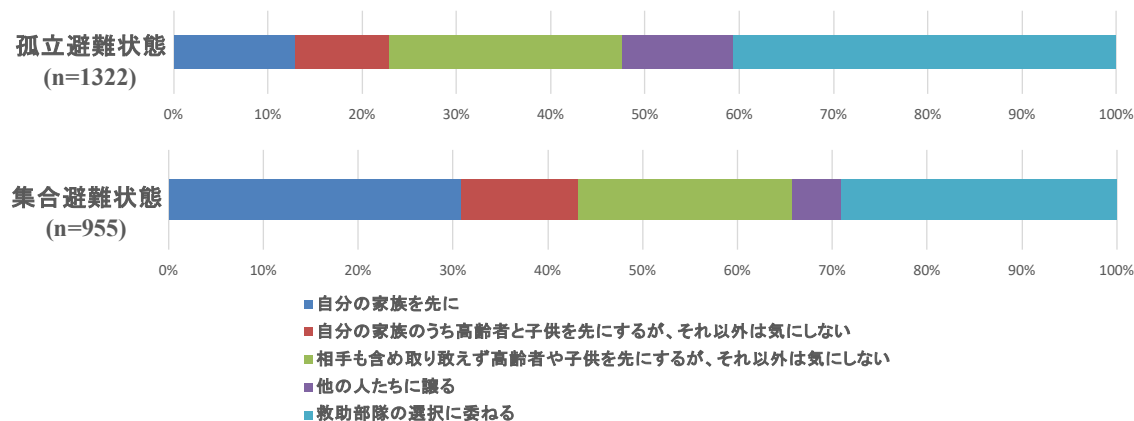


Fig.3-3 避難生活中における救助手順への希望

まず、Fig.3-3 に、避難状態ごとの救助の順番に対する回答者の意向を集計している。この質問では、ボートの乗船定員の限界に触れ、一度に救助できない場合に誰から救助してもらいたいのか、という質問した。それに対し、Fig.3-3 の下部にあるような選択肢から一つ選択してもらった。結果としては、避難状態の違いによって、利己的な主張の勢力に差があったことがわかる。まず、自宅などの場所において少人数で孤立しているグループ(A)では、自他問わず高齢者や子供を優先することを大事にしつつ、基本的には、救助部隊の指示に従うという意見も多くあった。一方で、避難施設など集団で避難しているグループ(B)では、自身や自身の家族を優先して救助してもらいたい意見を多数を占めた。グループ(A)よりも、利己的な判断の勢力が大きくなった分、救助部隊に判断を任せるといった意見が少なくなっていることも特徴的であった。グループ(A)では、自宅という普段から親しみのある場所での避難生活を送っていることから、救助を急いで求めるほどの切迫感を抱いていなかったのではと考えられる。逆に、グループ(B)では、そんな自宅を離れ、あえて避難施設に集まっていることから、早期の状況改善をより強く要求しているためではないかと推察される。

ここで、グループ(A)の反応については、注意すべき点がある。それは、グループ(A)の方が、より利他的な判断ができる回答者が集まったというわけではなく、前節にあるように、救助されるまでの期間を短く評価していたためではないかと思っている。例えば、避難生活が3日以内に終わると考えていれば、あえて避難施設で救助を待つという選択や、救助されることを急ぐ必要もないと判断できてしまう。しかし実際は、自宅などで孤立している状態のほう

が、飲食料や生活インフラの停止、情報の欠如など、避難生活の負担そのものは大きいはずであり、それが二週間も続くとすれば、救助をゆったり待つ余裕もないといえる。そのような、救助期間への過大評価が、グループ(A)の回答者に大きなバイアスをつくってしまっているという観点にも留意が必要である。

次に、自身の判断ではなく、他の住民の判断を予想してもらった質問をした。内容としては、一度に救助できない場合に誰から救助してもらおうか、という質問に対し、他の住民はどのような意見をもっているだろうか、という他者の判断を予測してもらったものである。救助リソースの譲り合いにおいて、住民同士がお互いに歩み寄る姿勢をもつことが重要である。そのために、知らない住民との信頼関係がどの程度あるのかを調査することで、救助リソースの譲り合いの実現性について、また別の考察が可能であると考えた。その結果を Table.A4 に示す。

Table.A-4 では、グループ(B)の回答者に対して、自身の判断と相手がどう考えるかについての関連表を作成した。全体としては、他の住民が救助の順番を完全に譲るという想定はしていないという結果であった。また、自身の判断と同じものを他の住民も考えているという認識が強く表れた。この傾向は、グループ(A)においても同じであったため、Table.A-4 ではグループ(B)のものだけを提示している。こうした傾向があるとなれば、特に避難施設に集まった住民同士では、利己的な意見が多くあったことから、救助リソースの奪い合いがより激化してしまうという様子が推察できてしまう。グループ(A)では、比較的利他的な判断をしていたが、前述のように、救助されるまでの期間が長くなれば、やはりグループ(B)のような利己的な考えを抱き始める可能性がある。そうすると、浸水状態が長期化してしまう場合には、救助リソースの譲り合いを期待することがより難しく、住民間のガバナンスが崩壊しうる危険性を読みとれる結果となった。

3.4.3 住民の避難意識における態度変容の可能性

ここまでの分析と考察では、回答者全体で救助活動に対する期待がとても大きいことや、それにより避難生活の負担や救助の緊急性に対する意識を弱めてしまっているという可能性が見えてきた。このことは、大規模洪水を想定したシナリオにおいて、回答者が長期的な視点にたって避難行動を選択できていないのでは、という本研究が危惧する問題が、住民の避難意識上に実態として存在している証拠である。そして、その結果そのものは、研究段階で想定されたものであった。では、回答者自身が救助に対する知識をもった場合、どのような避難行動を選択するだろうか、という疑問が当然出てくる。

そこで、本アンケートの最終質問では、救助活動の限界についての知識を提供し、改めて避難行動を選択してもらったこととした。知識内容としては、”救助活動の限界から、避難施

設以外に滞在している住民の救助が遅れる、あるいは救助できない可能性がある”、という旨を提示した。これにより、非避難や垂直避難を選択した住民の考えを変容させられないかという期待をしている。ここまでの避難行動の選択では救助に対する意識が欠如していたことを踏まえ、直前に救助の知識をもったうえで回答者にとって望ましい避難行動を問いた。

Table.A-5 では、回答者の一度目の避難行動の選択から、二度目の回答での変動結果をまとめている。まず、Table.A-5 の結果から、回答者全体では、非避難の回答数が減少し、その分の回答数は水平避難や域外避難に集まった。これらの変動数は決して大きいものではなかったが、救出までの時間の短縮が期待できる避難行動に回答が集まる結果となった。こうした変動の背景には、事前に救助活動の限界に対する情報を提供したことが関係していると考えられるが、この結果だけでは不明瞭さは拭えない。そこで、別の視点から、行動変容の有無や影響度を考察してみた。

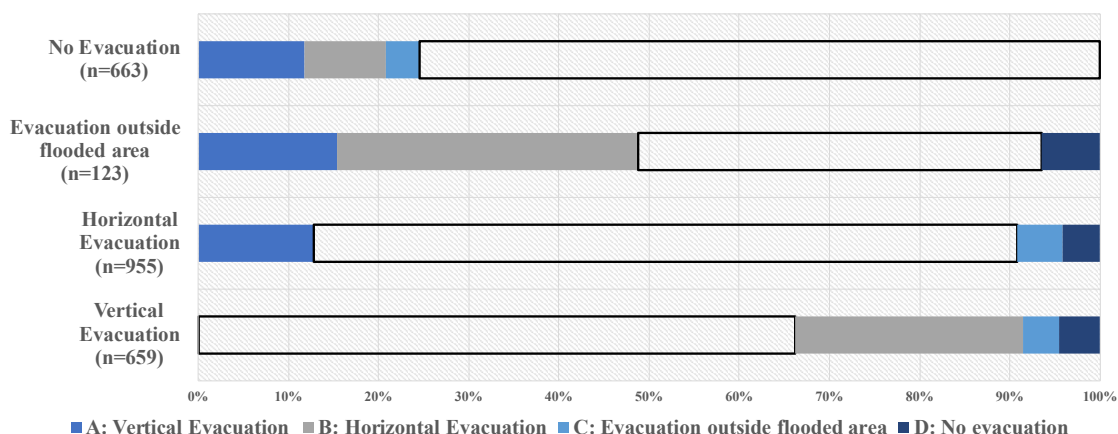


Fig.3-4 避難行動パターン別の行動変更結果

Fig.3-4 に元の避難行動パターンごとの変動状況として、Table.A-5 の内容をより視覚的にわかりやすく示している。Table.A-5 では、全体の変動傾向が小さく起こっていたと考えたが、より個々の変動結果に焦点を当てると、行動選択の変更がより激しく起こっていることがわかる。そして、元の避難行動から変更した回答者の割合や変更傾向も、元の避難行動パターンごとに異なっている。救助活動の限界という情報が、それぞれの避難行動パターンの回答者にとって、異なるメッセージや意識の変化を生じさせたものと考えられる。

まず、非避難や水平避難の回答者の大部分が意見を変えていないことに着目する。この二つの回答グループは、救助活動の限界に最も影響をうける避難行動を選択している先の情報提供の内容によると既に安全な避難行動を取れている、水平避難の回答者の意識がほと

んど変動しないという結果となったことは予想通りであった。他方、逆に救出されないリスクがある避難行動として注意を促した非避難の回答者の大半も避難行動を変更しなかった。本来リスクを軽減するように、今度は避難をするよう考えを変えるものだという予想に反する結果であった。

その背景については、やはり救助や避難生活の期間を過小に評価していることが原因となってしまうと考える。ここまでの分析結果から、回答者全体で自宅での避難生活の方が少ないと考える選好性があることがわかった。それに加え、非避難者の多くが、浸水の恐れがない場所に居住しており、既に安全が確保されている。そうした心理状況にあつて、避難生活の期間を3日程度であると認識しているとすれば、あえて避難場所を変更するという緊迫性を感じられなかったのではないだろうか。例え、救助活動には限界があるという事実をもとに、避難施設以外の場所で避難生活を過ごすことのリスクを提示したとしても、回答者自身がリスクを過小評価してしまつては、行動変容の効果が薄いという結果だと考察した。

さて非避難と同じく、避難施設以外の場所で孤立する避難行動である垂直避難グループでは幾分かの変化が見られた。垂直避難の回答者全体の1/3程度が判断を変え、そのほとんどが救助期間を短縮できる水平避難を選んでいった。この変化については情報提示の狙いに合致するものであったが、非避難の回答者に比べ素直な行動変容結果になったことは注目すべきだろう。救助活動の戦略的な観点では、非避難も垂直避難のどちらを回答者が選択したとしても、浸水域内で孤立している住民の救助という活動内容に違いはない。そのため、”最悪の場合、あなたを救助できない”というメッセージは、両者にとって同じメッセージ内容ではあるはずだが、Fig.3-4からは非避難グループと垂直避難グループではこのメッセージへの感度が異なつたということが示唆された。非避難と垂直避難の行動の差には、危機意識の度合いや避難したという事実には根本的な違いがある。なんらかの危機意識をもとに避難を執行した垂直避難グループでは、避難生活の負担を少しでも減らせるような行動に変えるという心理的な負担が比較的少なくなつていたものと考えられる。

最後に域外避難グループの変化について考察する。域外避難グループは他の避難行動グループの傾向と異なり、回答者の多数が避難行動を変えており、主に水平避難を行うという判断に変えている。本来、浸水域に留まらず、救助部隊の到着を待つ負担や全体的な避難生活の環境も良好であるはずの域外避難者が、あえて浸水域にとどまろうと考えを改めた結果は驚くものであった。この判断理由について回答者に直接尋ねることはできなかったが、解釈としては二通りある。

一つ目は、域外避難での避難生活がうまくイメージできておらず、メッセージの意味をうまく把握できず、メッセージの内容をそのまま受けとってしまったという観点である。メッ

ページには,”避難施設”というキーワードをいれていたことから、避難所・避難場所への避難を印象づける水平避難という回答がそのまま選ばれてしまったのではないだろうか。もう一つの可能性は、想定以上の避難生活期間に対し、親しみのある場所を離れることや域外での避難生活の負担増大を危惧したというものである。域外避難は、今回の避難行動の回答群のなかでは、最も避難コストが高く、また道中の被災リスクも高い行動である。それに加え、域外での避難生活の負担が大きいと認識してしまえば、やはり域内避難で止めようとする考えになってしまったのではないだろうか。今回の結果だけでは、特に後者の可能性事態は低い、現実的な避難者の意識として起こりうる現象であるため解釈として加えた。

この点を含め、全体的な結果を受けて、他の避難行動グループでも域外避難に変える回答者の割合が総じて低かったことから、回答者のなかで避難後の生活風景がまだ具体的に意識できていないと感じられた。では、救助活動に関する情報の提示が、行動判断に何らかの影響をもたらさなかったといえ、そうではないと考えている。その理由として、Fig.A-6 に示すように、情報提示後の避難行動グループでは、早く救助されたいと考える回答者が水平避難や、特に域外避難を選択するようになっていることが挙げられる。Fig.3-2 でははっきりした違いが見られなかった各避難行動グループの期待日数が、Fig.A-6 ではその差がより広がっている。また、2 回目の避難行動判断に対し、再度数量化 2 類で分析すると、Table.A-6 にあるように救助期間や救助待機中の負担に関する項目の偏相関係数の大きさが相対的に増大し、他の項目群のなかで占める影響度も大きくなっている。

これらのデータから、救助活動に関する情報提供が、回答者のなかで救助というものへの意識をより高めることにつながったという可能性があることがわかる。一方で、メッセージの中身や、回答者の避難生活や救助への過大な期待が、行動変容を思わぬ方向性に起こしてしまったのだろう。

3.5 議論

ここまで、本アンケートの結果と分析、そして考察までを一貫して行ってきた。これまでの知見として何が得られたのか、そしてそれを今後の洪水対策にどう活かせるのか、実務的な視点を取り入れつつ、本調査の内容を議論する。

本調査では、避難時においてその後の救助活動や避難生活を意識した長期的な視点に経った意思決定ができないという背景が見えてきた。その結果、多くの回答者が域外避難を選択できず、また浸水域内で要救助が孤立するという避難状況パターンの状態が発生する事態となってしまった。その一要因として避難が必要な場面において、避難行動の選択が洪水氾濫への危機意識の度合いや自宅という生活空間への選好性の力関係により決定されている可能性が示唆された。特に、浸水の危険性が少ない高さに現在の居住場所がある場合に

は、あえて避難しないという判断が優位になっていた。このことは住民が避難行動を検討する際に、各行動のコストとベネフィットの関係性が大きな行動要因になっているという、いくつもの避難意識に関する研究でこれまで指摘されてきた内容と相違ない。東京のように3階以上の建物が多く存在し、そもそも浸水の脅威そのものが居住環境に及ばない場所に住む住民が多数存在している地域では、大規模な浸水が発生した場合に、多くの孤立した要救助者が発生してしまうと考えることは難しくない。今回の調査では非避難の回答者は相対的に少ない割合であったが、既往の報告や事例を踏まえると、もっと多くの住民が避難しないと想定すべきであろう。本調査の避難行動結果そのものの理解には改めて注意が必要であろう。

もっと注意すべきことは、域外避難を選択する回答者があまりにも少ないという結果である。そしてその背景には、救助活動の限界や救助を待つ間の避難生活の負担に対する認識がまだ十分にされていない可能性があった。救助されるまでの日数が全体として短く評価されていたことを踏まえると、短期間の避難生活であれば浸水域外での避難生活よりも浸水域内での避難生活、それも自宅に留まるほうが避難生活の負担が少ないとまで思われていたのではないだろうか。しかし浸水域での避難生活の実態として、電気やガス、水道といったインフラの停止も決してあり得ない話ではない。そして、都会エリアのように浸水時に膨大な要救助者が発生するケースでは、住民が浸水域内の避難生活から解放されるまでかなりの期間を要する。避難生活が長期化することで、衛生・健康面での問題や飲食料の枯渇、浸水域内での閉塞感による心理的負担も深刻になってくる。もちろん浸水域内の避難施設に集合したからといって安心できる状況になったわけではない。そのため、避難のための時間や体力に余裕がある限りは域外に避難することが望まれる。

3.6 本章のまとめ

本章では、長期浸水が懸念されている地域に住む住民に対し、Web 上での避難意識調査を行なった。その結果、ほとんどの回答者が域外の避難を選ばず、浸水域内で留まる傾向を示した。その背景として現在の居住場所が浸水の危険性にないという安心感が、中高層建物が多く存在する都会という地域特性により生み出され、結果として避難判断を過小評価している可能性がわかった。また、新しい知見として避難を検討する際に早期避難だけを重視し、長期的な視点での判断ができていないことがわかった。具体的には浸水域内での救助活動期間への期待が過大であることや、避難生活の負担を小さく評価してしまっている可能性が示唆された。垂直避難や非避難への意識啓発も有効とされる地方型の洪水対策と違い、都市部では住民の多くを域外に避難させる必要があるにもかかわらず域外に避難しようとする回答者があまりにも少なかった。

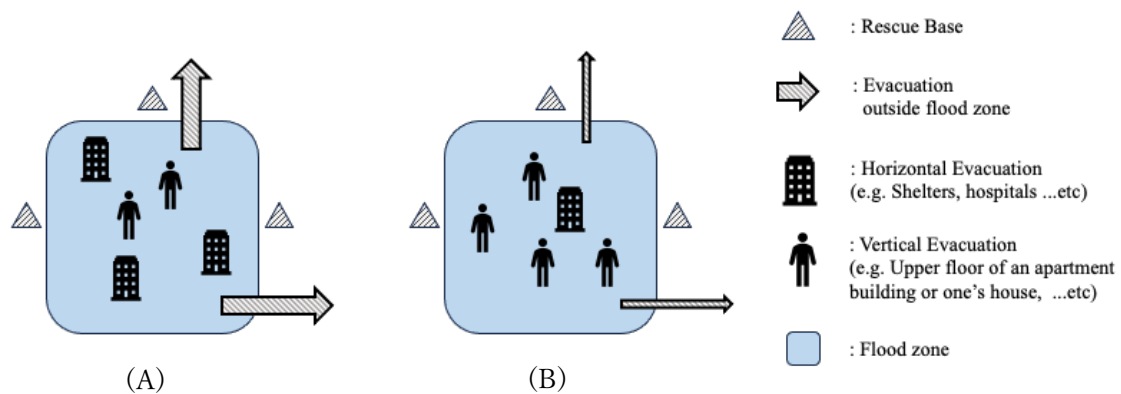


Fig.3-5 住民の避難行動パターンへの仮説:

救助資源の圧迫を改善するためには、A) の避難状況パターンのように、多くの住民が区域外避難を行うか、浸水境界近くの避難施設に集合することが望ましい。しかし、現実には避難状況パターン B) のように、多くの住民が域外に避難せずに自宅などにとどまり、浸水域内で孤立する住民が増加する可能性が高い。この背景には、「避難できない」「避難しない」と思わせる要因があると考えられる。その要因として、中高層建築物の存在や長期的な視野で判断する意識の低さなどが想定される。

さて今回の調査結果をから、住民の意識の中に救助に対する意識の希薄さや、逆に期待の高さが確認された。このことを踏まえると、江東デルタ地帯のような膨大な数の住民を抱える地域においては、大規模水害時には多数の要救助者の発生が想定され、また地域内に孤立住民が分散して存在する事態となりうる(Fig.3-5(A))。このような避難状況はその後のポート救助活動の手順や性質を考慮すれば、より活動時間を延長させる要素となりうる。そのため、やはり救助活動のリソース不足が深刻になると想定できる。

今回の調査結果に対し、住民側の意識変容の必要性や、逆に救助活動の計画においても住民が避難しないというケースへの対策が求められるだろう。前者については、救助活動に関わる住民側の理解をより促進する必要があるだろう。特に(1)救助活動の限界の深刻さと救助方針の明確化、(2)他の住民との影響関係、について救助活動の実態を把握する必要がある。後者については、住民の避難意識の現状を踏まえ、想定される救助活動の深刻さに対する新たな戦略・方策を導入する必要があるだろう。このような観点から、以降の章では住民の避難行動・救助活動の両方の課題へのシナリオ分析をプラットフォーム上で実施する。

—参考文献—

- [1]. 戸村翔, Bob Maaskant, 千葉学, 舛屋繁和, 山田朋人: 水害時における避難率の推定方法に関する基礎的研究, 河川技術論文集, 第 28 巻, pp.349-354, 2022.
- [2]. ウェザーニュース, 【減災調査 2018】西日本豪雨、「自分は大丈夫」など...84%が避難せず～内 25%が「避難したくてもできなかった」、判断の遅れと薄い危機感が浮き彫りに～, Available online: <https://jp.weathernews.com/news/24579>
- [3]. 日本経済新聞, “避難率 4.6%どまり 西日本豪雨、被災 3 県の 17 市町”, Available online: <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO35031380V00C18A9AC8Z00>
- [4]. 岩船昌起: 水害・土砂災害における高齢者の体力と避難行動- 2012 年熊本広域大水害時の球磨村での検証 -, 第 14 回年水害に関するシンポジウム, pp. 11-15, 2015.
- [5]. 矢守克也: 「避難学」を構想するための 7 つの提言, 災害情報, No. 18-2, pp. 181-186, 2020.
- [6]. Kahneman, D: *Thinking, Fast and Slow*, Brockman, 2011.(= 村井章子訳『ファスト&スロー-あなたの意思はどのように決まるのか? 下』早川書房)
- [7]. 片田敏孝, 児玉真, 金井昌信, 岩崎隆雄, 手島知史 “災害対応意識デルファイ調査を用いた住民の態度行動変容過程の追跡”, 土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2004.
- [8]. 江東区, 東京都, 「江東区ハザードマップ」
Available online: https://www.city.koto.lg.jp/470601/documents/01hm_flood_english.pdf.
- [9]. 墨田区, 東京都, “墨田区ハザードマップ”, Available online: https://www.city.sumida.lg.jp/anzen_anshin/bousai/suigai/hazardmape.files/hyoushi.pdf
- [10]. 江東区, 東京都, “江東 5 区大規模水害ハザードマップ”, Available online: <https://www.city.koto.lg.jp/057101/bosai/bosai-top/topics/documents/haza-do.pdf>
- [11]. 片田敏孝, 桑沢敬行, 信田智, 小島優, “大都市大規模水害を対象とした避難対策に関するシナリオ分析”, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.1, pp.71-82, 2013.
- [12]. Crowne, D. P and Marlowe, D., “A New Scale of Social Desirability independent of psychopathology”, *Journal of Consulting Psychology*, 24, pp.349-354, 1993.
- [13]. Nederhof, A.J., “Methods of coping with social desirability bias: a review.”, *European Journal of Social Psychology*, 15, 263-280, 1985.
- [14]. Joinson, A., “Social desirability, anonymity, and internet-based questionnaires. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 31, 433-438, 1999. Doi: 10.3758/BF03200723
- [15]. Hayashi, C., “On the Prediction of Phenomena from Qualitative Data and Quantification of

Qualitative Data from the Mathematico-Statistical Point of View”, Annual of the Institute of Statistical Mathematics, 3 (2), pp.69-98, 1952.

[16].Hayashi, C., “On the Prediction of Phenomena from Qualitative Data and Quantification of Qualitative Data from the Mathematico-Statistical Point of View”, Annual of the Institute of Statistical Mathematics, 3 (2), pp.69-98, 1952.

[17].Hayashi, C., “Sample Survey and Theory of Quantification”, Bulletin of the International Statistical Institute, 38: 505—14, 1961.

[18].及川康, 片田敏孝, “河川洪水時の避難行動における洪水経験の影響構造に関する研究”, 自然災害科学, 1999.

第4章

大規模洪水発生に向けた長期的な視点での住民避難行動の評価

---概要---

前章では長期的な浸水想定地域の住民の避難意識を把握し、ほとんどの回答者に救助活動の実施を見据えた避難意識が醸成されていないことが判明した。昨今の救助活動の限界は救助活動だけではなく、救助を待つ住民自身の負担にも関係している。そして住民自身の避難行動によってはこの負担の多寡を変化させうると見込まれる。そこで本章では、洪水発生時の救助活動の実施を踏まえた住民の避難行動や計画についての知見をプラットフォーム上のシミュレーションを用いて収集する。そこでまず浸水域での救助活動下における住民への負担を把握し、長期的な視点での避難行動の見直しが必要な理由を見出す。次に実市街地での洪水発生シナリオをもとに、住民の避難先選択方法の違いが、その後の救助活動にどのような影響を与えるのかを考察した。結果、短期的にはリスクのある避難行動を選択することで、最終的には救助状況を改善できるというジレンマ構造を発見した。また住民自身が避難行動を選択する際には、住民個人の避難意識が地域内の別の住民の安全に影響を与えていることという構造があった。こうした社会的ジレンマの解決には、行政の対応のみならず住民個人個人の態度変容が重要であると評価された。

4.1 はじめに

前章では、長期浸水の発生が懸念されている江東デルタ地帯の住民に対し、救助活動の実施を踏まえた避難意識が形成されているかをアンケート調査により確認した。その結果、ほとんどの回答者が浸水想定領域外に避難することを選択しないと判明した。その背景として避難生活で救助活動を待機することへの意識が希薄であることや、救助活動への期待が非常に大きいことが挙げられた。この結果を踏まえると、今後大規模洪水が起きた際には大多数の要救助者が発生すると想定されるだろう。

住民が浸水域内の避難所へ避難した、或いは自宅から避難せず済んだからといって無条件に安心できる状態になったとはいえない。浸水域での救助計画を検討した報告[1,2]にあるように、要救助者の数が増えることで、浸水域内に残った住民全てを救助できるとは限らない。実際、浸水域内の救助活動では地上での活動よりも不利な環境のもとで行わなけ

ればならない。その浸水域での主な移動手段であるボートの乗船定員や移動速度の遅さという地理的・機能的制約が大きく、救助活動の完遂に多くの時間を要する。そして浸水域内に残された住民の健康状態を考慮すれば、時間的な猶予も余裕があるわけではなく、迅速に救助活動を完遂しなければいけない。しかし江東デルタ地帯を対象とした救助時間算定によると、排水処理の効果を見込まない場合には2週間以上もの期間中、浸水域から解放されない住民が発生するとされている[2]。要救助者数が増えることで、救助活動だけでは解決できないという事態がより深刻化すると想定できる。

もし住民の避難行動をはじめとした救助活動前の状況を改善することができれば、この事態を緩和することができるかもしれない。この救助待機の状況は、いうまでもなく市街地が浸水する前に地域住民が形成した避難状況と同じとみなせる。つまりは、住民の避難行動を変更できれば、その後の救助活動にとって有利な要救助者分布状況を形成することもできるだろう。そして、救助活動が円滑に遂行できるようになれば、迅速な救助が必要な高齢者や子供、要医療者へと救助リソースを充てることができ、より多くの住民を救助できるようになるだろう。他方で、事前に域外に避難していれば、救助部隊の到達を待つことなく、より安全な場所で避難生活を行うことができる。

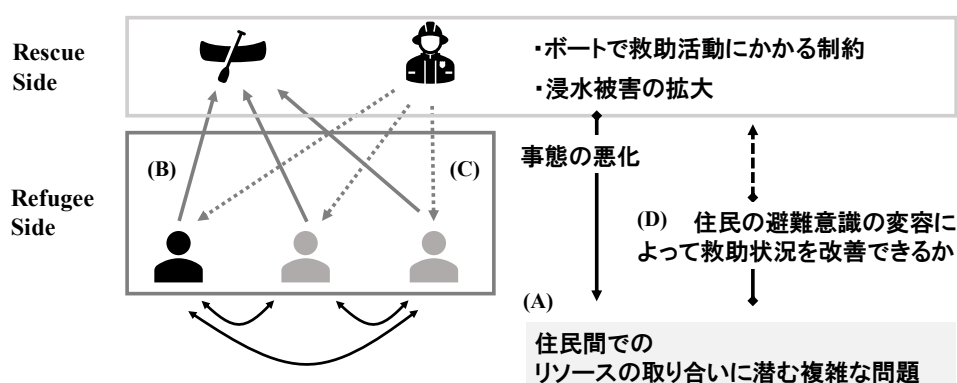


Fig.4-1 浸水域での救助活動下での住民への影響

長期浸水地域での救助活動の性質上、住民はより複雑なリスクに直面することになる。たとえば、救助リソースをめぐる住民間の取り合いが激化し (B) , その結果として救助トリアージが深刻化することが想定される (C) . 救助隊だけでは対応できなくなった状況では、住民自身の意識を変えることで、救助活動におけるリスクを緩和し、マネジメントも容易にできるかもしれない (D) .

こうした災害対応の時間的なつながりを考慮すれば、救助活動の限界という事態は決して住民が無関心でいられる問題ではないだろう。水害発生時の住民の避難行動の内容が、

その後の救助活動期間中での他の住民の健康や生命に影響を与える。そして、その住民自身の避難生活の負担の多寡にも関係してくる。これらの問題は、域外に避難しない住民の数が增えるほど、より深刻化していくだろう。そこで第3章のアンケート結果を踏まえると、浸水想定域内の住民の避難行動や避難計画を見直す必要があるだろう。

しかしこの避難計画の策定において、たとえば避難しないという判断が本当に“間違っただ”選択であったのかということを一概に述べられないことである。避難行動の研究では、概して早期の避難完了を遂行するための知見を提供し、混雑を回避するための地域での分散型避難や建物上階への垂直避難等の浸水域外への避難に拘らない避難行動を推奨している。何よりも住民の安全を確保するという短期的な目標を目指せば、場合によっては避難しないという判断も良いとされる。他方、浸水後の救助効率という長期的な視点にたてば、浸水域内での避難者数を減らし、住民の避難場所を集中させた方が良いとも考えられる。これらの避難行動は互いに違った避難意識であり、避難行動を判断する上で考慮すべきリスクが違っている。水害時の住民の避難計画においてはこうしたジレンマ構造を考慮して検討すべきでないだろうか。

そこで本章では、第3章での住民の避難意識アンケートを踏まえ、大規模洪水発生時の住民の避難計画や行動内容についてプラットフォーム上で検討する。検討内容は大きく二つあり、1つ目は救助活動期間中の住民への負担について救助シミュレーションを用いて把握すること、そして2つ目は避難と救助という時間的に連続した活動プロセスから住民の避難動態が後続の救助活動に与える影響を考察し具体的な避難行動プランをたてることである。1つ目については、現状の住民の避難意識内に救助活動からの影響を考慮できていないことを踏まえ、救助部隊の到着を待機する間の避難生活や住民間の救助のリソースの取り合いがどの程度深刻なものであるかを理解しておく必要があるだろう。浸水域での救助活動を対象とした研究事例が少ないことに加え、救助を待つ住民側の視点から分析されたものはない。そのためプラットフォーム上の救助シミュレーションを用いて、昨今の救助活動の限界が住民に与えるインパクトを改めて把握する。2つ目は、1つ目の状況に対し、住民が選択すべき避難行動やそのリスクの内容を検討することである。今回は住民の避難行動のうち、“避難先の決定”という側面にだけ着目した住民の避難行動シナリオをもとに発災時の避難状況を予測し、その後の救助活動状況について可視化する。住民が避難する対象として、近くの避難ビルや事前に知らされている場所を意識することが多い。そこでプラットフォーム上の住民避難シミュレーションと救助シミュレーションを用いて、住民個人が持つ局所的な避難先情報に基づく避難行動が救助活動までの災害対応プロセスを通じて、どのような影響を与えるのか考察する。

4.2 救助活動期間中の住民への影響把握

4.2.1 手順と操作内容

今後大規模化が想定される洪水・氾濫では、救助活動のリソースが枯渇することは避けられない。そのため、浸水域で救助を待つ住民は、限られた救助リソースを住民同士で取り合う構造となる。他方、限られた救助リソースの中、救助隊ができる限り救助活動の質を高めるには、住民ごとに救助の優先順位をつけ、優先度の高い住民の救助に集中することを検討すべきである。仮に、優先順位を確実に守った救助活動を実施できれば、高齢者や子供、要医療者といった住民を最大限多く助けられるだろう。

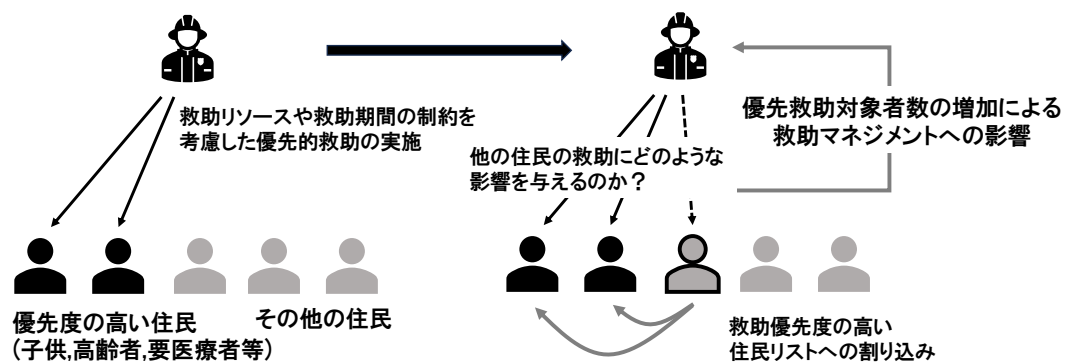


Fig.4-2 想定される救助待機中の住民間の影響関係

一方で、現場で発生する不確実性により、一貫した戦略方針を維持できないという現実的な課題を打破しなければいけない。例えば、要医療支援者の救助を優先すべきであるが、救出先までの経路途中で別の住民を発見したケースである。この場合、倫理的な観点からこの住民に目をつぶるような行為を現場では取れない。また、住民の強い救助要請などを受け、事前の想定にはなかった優先対応を求められる場合もある。

そうした現場での突発的な優先対処の必要性が発見した際に、救助のマネジメントがどのような影響を受けるのか簡単なケースでの実験で確認する。また、住民側の視点に立ち、他の住民の救助優先順位の割り込みが、本来優先的に救助されるべき住民の救助時間にどのような影響があるかを確認する(Fig.4-2)。ここでは、そうした浸水域での救助活動を待つ住民同士が、お互いにリソースを取り合う関係であること、そして水害対応の救助活動であることが、その問題をより一層深刻化していることを確認する。

Fig.4-3 に本検討項目におけるプラットフォームの操作を示す。

本節の検討項目では、第2章で説明した救助モデルだけをプラットフォームで使用する。救助活動シミュレーションのための環境マップについては、江東デルタ地帯を計算領域とした事前データが用意されているものとする。また、救助活動時の浸水状況については、第

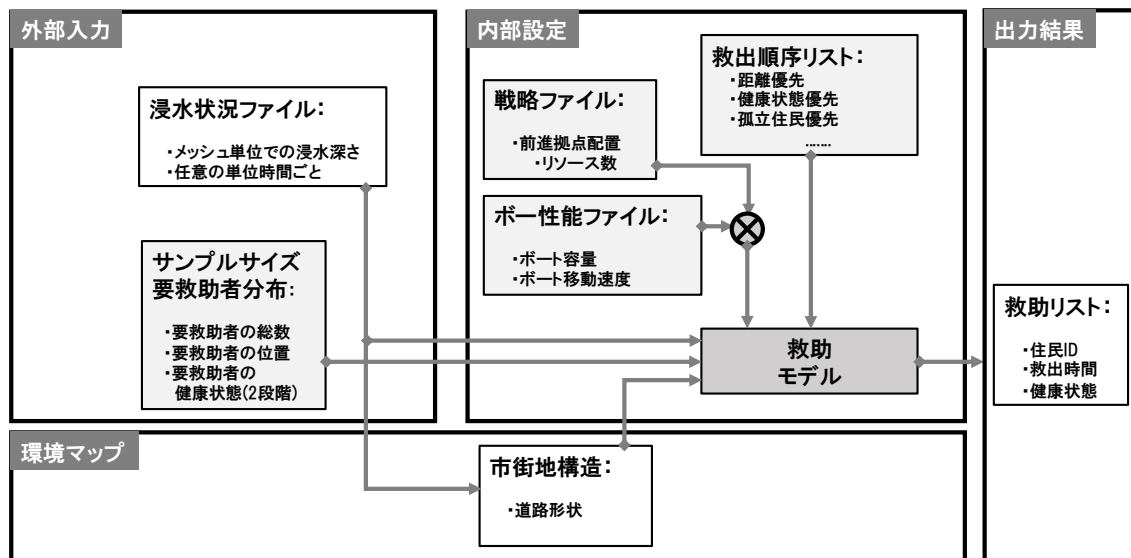


Fig.4-3 プラットフォームでの操作手順

2章で説明した洪水・氾濫シミュレーションの結果を外部ファイルとして与えられているものとする。その他シミュレーションのためにユーザーが用意すべきデータは、1)戦略ファイル、2)ボート性能ファイル、3)救出順序リスト、4)要救助者分布、である。

1) 戦略ファイルでは、浸水域での救助活動の際に設置される前進拠点の配置及びボート数の設定を行う。2) ボート性能ファイルでは、1)に設置されるボートの能力を定めるものであり、ボート容量や移動速度を決定する。3) 救出順序リストでは、要救助者の救出順序を決めるものであり、救助方針を決定するものである。あらかじめ距離優先や健康状態優先で救出するためのプログラムが用意されており、ユーザーは目的に沿う方針を選択することができる。4) 要救助者分布では、救助シミュレーションで扱う救助対象者の位置や健康状態をリストで与える。このデータは避難シミュレーションの結果をそのまま利用することも可能であるが、本節の検討項目では小サンプルサイズでの擬似状況を用意する。

最後に、この計算結果は各住民の救出時間等を記した救助リストとなっている。この出力データを比較することで救助の順番や救助方針の違いによる住民の救出時間の変化や、逆に救助待機時間の変化を算出することができる。以降の項では、これらの 1-4)の準備データの具体的な内容を説明する。

4.2.2 各種計算条件の設定

a) 孤立住民の配置

今回、住民の配置については対象市街地の建物配置を参考に、ランダムに抽出した 100 地点を対象とする (Fig.4-4)。各箇所一人の住民がいるものとして、その情報は既知情報とし

で各エージェントに与えられているものとする。また、エージェントが救出する際には、孤立住民の救出ポイントが救助エージェントの一定距離範囲内に入った場合に救出作業が開始されるものとする。なお、本来救助時間の想定や救助活動の戦略を検討する上では、相当の孤立住民を対象として計算すべきである。ただ、今回はボート救助活動の性質を把握すること、そのリソースの共有構造下にある住民同士が相互に与える影響を把握するという目的であるため、その様相をよりクリアに理解できるよう小規模の救助活動を想定している。

次に、各住民への属性情報について説明する。限られたリソースで、想定した期間内に全ての住民を救助できるとは限らない。救助活動が長期化すると想定すれば、浸水域内の劣悪な環境において、早期の医療対応が必要な要医療支援者や、健康被害の危険性がある高齢者などの体の弱い人や子供の救出も優先されるべきである。

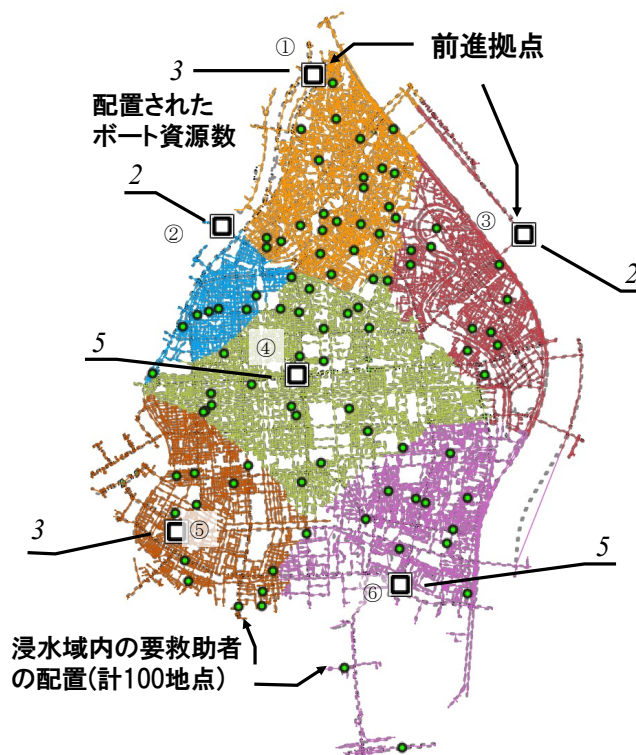


Fig.4-4 ケーススタディにおける初期ボート資源配分と孤立住民の配置

図中で緑色の点は救助を待つ住民の位置、四角の印は浸水地域における救助チームの活動拠点を示している。レスキューチームは、割り当てられた前進拠点からボートにより人命救助に向かう。

そうした背景から、多くの活動マニュアルでは、そうした救助対象の属性を考慮した優先救助の必要性を訴えている[3]。そこで、本研究でも、救助の戦略のひとつとして、住民の健康

状態を考慮できるモデルとした。具体的には、救助の対象である住民が高齢者や子供、あるいは要医療者のように、通常よりも優先的な救助が求められるかどうか、の有無だけを識別し、住民に2つの優先度レベルを設定した。これにより、これから述べる戦略方針の設定において、住民の健康状態を考慮した救出を可能にする。

b) 戦略

江東デルタ地帯の中で、6ヶ所の前進拠点と、初期のボートの配分計画を Fig.4-4 と Table.4-1 にまとめた。今回は、孤立住民数が少ない簡易なケースであるため、それに合わせて救助リソースとして不足する程度のボートを配置している。また、前進拠点の配置についても、全体をある程度均等な面積に分割できるように意識した。

次に、本稿で想定する戦略方針を説明する。戦略方針によっては、住民の救助時間や住民ごとの救助順序に影響を与えうるだろう。その場合、住民が浸水域のどこに避難しているのかといった配置状況や、年齢や健康状態といった各住民の属性を考慮したうえで、方針を立てていくことになる。また、救助活動だけでなく、医療チームや排水処理や道路整備を担うインフラ企業などの他の災害対応部隊と適切な連携をとることも視野に入れられる。

このように、戦略方針として、検討すべき項目は多く、一概に救助活動の方向性を規定することは難しい。ただし、本稿では住民の避難状況や救助要請といった、住民の意思決定の影響が、地域全体の救助マネジメントにどのような影響を与えるのかを確認することが主な目的である。そのため、救助方針の改善や、救助活動の効率化についてあえて議論はしないこととする。また、救助活動全体のパフォーマンスについて、住民側の意思決定に係る要素のみに焦点をあてるため、救助活動の方針については一つに固定した上で、以降の議論を進めていきたい。

Table.4-1 ボートの容量・移動性能

(*) ロープ曳きでボートを動かす場合は Fig.2-14 のように速度を設定する

Boat Functions			
Travel Mode	Velocity [km/h]		Maximum number of residents on board
	No rescuers on board	Any rescuers on board	
Rowing	2	1.2	2
Towing	Depending on Depth(*)	(*) × 1.6	

さて、既存の活動マニュアルの中には、複数の優先事項が規定されている。例えば、有効な戦略として考えうるものとして、1) 前進拠点からの近い住民の救助や 2)健康状態上の緊

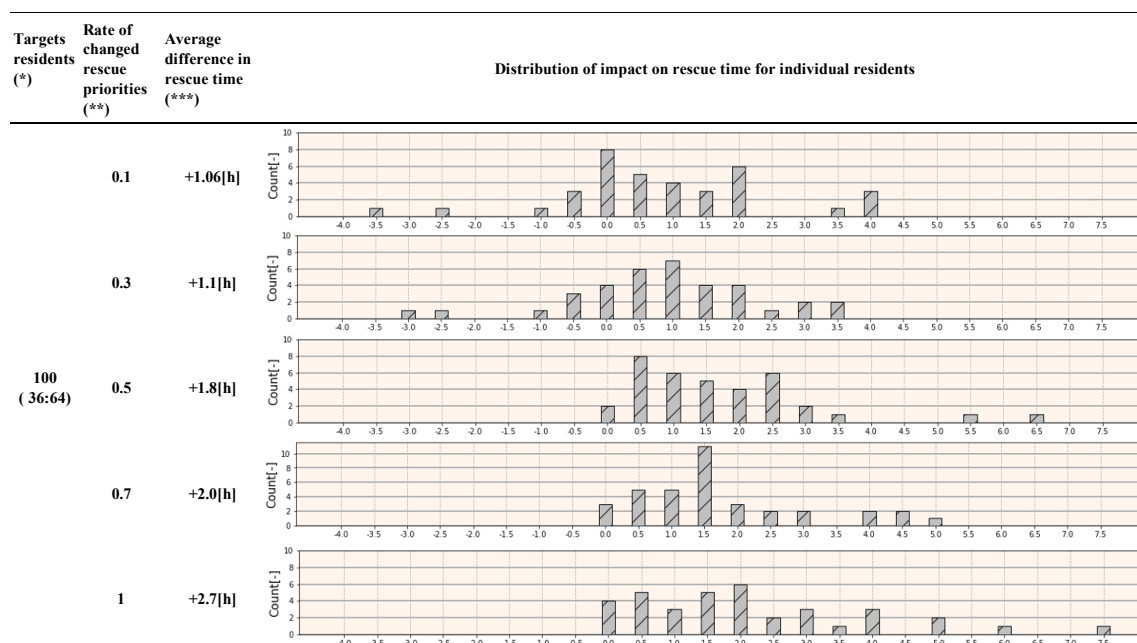
急度の高い住民から救助,といったものがある. こうした戦略は, 単一の戦略としては行動の合理化や倫理的な正当性が認められる. そこで, 本研究では, 高齢者や子供, 要医療者などの救助優先度を高くし, それ以外の住民の救助は後に回すものとした.

4.2.3 シミュレーションの結果

シミュレーションの結果を Table.4-2 に示す. 今回設定した要救助者数 100 人のうち, 救助優先度の高い属性の住民は 36 人であった. そこで, それ以外の救助優先度の低い 64 人のうち, 強い救助要請を出し, 自身の救助優先度を高める住民を何人か発生させ, 救助優先度の高い属性の住民 36 人の救助時間の変動を確認した. そこで救助優先度を意図的に高める住民の割合を 10%, 30%, 50%, 70%, 100%へと変化させていき, 本来優先的に救助されるべき住民の救助時間がどの程度影響を受けるかを可視化していく.

その結果として Table.4-2 に示すように, 救助優先度を高めた住民が多く生まれるほど, 本来優先的に救助されるべき住民の救助時間がより遅延することとなった. これは救助リソースをより多くの住民で取り合う構造となり, 住民ごとの救助時間に変動が生じたためと考えられる. 浸水域での救助活動では, 一人の住民を救助するだけでも大きな時間を要する. そのため小規模な救助状況であっても, 救助リソースの共有関係の激化が救助時間により大きな影響を与えていることがうかがえる. 大規模な浸水域での救助活動には, 莫大な救助時間を要することが指摘されてきたが, その背景には住民間でその救助リソースの取り合い構造が

Table.4-2 優先救助者の救助時間の遅延



(*) Parentheses indicate the original percentage of residents with high priority for rescue and the rest of the population

(**) Rate of residents who requested for priority rescue through a call for help out of the normal priority residents.

(***) Impact on rescue time for residents with high rescue priority; positive numbers indicate a delay in rescue time, while negative numbers indicate an earlier rescue

非常に深刻であることがわかる。住民の視点では、救出されるまでの長い時間を浸水域内で避難生活を送ることになるというリスクに加え、住民同士で負担を与えあっているという影響関係が潜んでいたことを見出せた。

4.3 長期的な視点での避難行動の評価

4.3.1 手順と操作内容

前節では、救助活動のシミュレーションを用い、住民視点で救助待機中の負担を分析した。そこでは救助リソースの取り合い構造の激化により、本来早く救助されるべき住民の救助時間が延びるという事実がでてきた。大規模な要救助者の発生時には救助活動を完了するために2週間以上という長い期間を要することになる。そうした状況で域外避難ができたはずの住民が避難しないことで救助対象の住民数を増やすことになれば、これらの救助活動上の問題をより深刻化してしまう。そこで、救助活動の限界に対し長期的な視点での避難行動の判断や計画を見直す必要があるだろう。

上記を達成するためには、住民が実施した避難行動の違いによる救助活動への影響を可視化し、避難行動とその後の救助活動の時間的なつながりについて考察することとする。ここではプラットフォーム上の住民の避難行動シミュレーション及び救助シミュレーションを連続させて使用し、以下の手順を辿るものとする。

(1): 江東デルタ地帯内の住民の初期状況を人口データやパーソントリップ調査の結果から設定する。

(2): 住民の避難意思決定モデルを導入する。ここでは、避難先の選択傾向の違いによるいくつかのシナリオを用意し、それぞれの避難状況の結果を可視化する。

(3): (2)で得られた避難状況を初期条件とした浸水域内の救助活動シミュレーションを通じて救助状況の推移を把握する。

(4): (2,3)により、住民が実施した避難行動の違いによる各住民の救助時間等を分析し、各避難行動の長所あるいは短所を把握する。それにより、今後の大規模洪水の発生に備え、長期的な視点での避難行動の選択や計画の立案を検討する。

本シミュレーションの全体像を Fig.4-5 に示す。災害発生後に変化する災害対応活動の現状を考慮し、時間経過によって避難モデルと救助モデルが直列方向に計算される。また、全体を通じて洪水氾濫シミュレーションによる市街地環境が変化している。この洪水シミュレーションについては、前章同様に IRic[4]で事前に計算した浸水データを反映している。

本章での新たな要素として、氾濫の状況に応じて行政が避難情報を発信し、住民の避難行動が開始するというトリガーを用意している。また、避難状態の変化が落ち着き後、浸水域内に残っている住民については、継続してボートでの救助活動が始まるものとした。そ

の後避難完了から救助活動開始までの期間、洪水状況の考慮し、安全な救助が可能な程度まで状況が落ち着くまでの期間、3日ほど空けている。

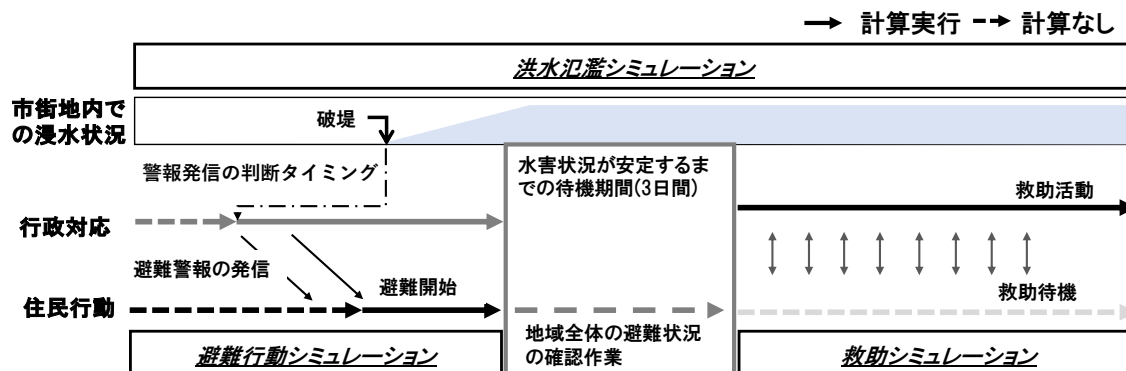


Fig.4-5 避難・救助の連続シミュレーションの流れ

今回それぞれの活動については、住民個人或いは救助部隊が意思をもって活動するエージェントモデルとして表現した。その際には、救助活動においては救助状況の変化という環境に応じて行動を変える仕組みとして、住民の避難行動については住民自身の位置情報と避難所の位置関係、行政からの情報発信を受け避難の意思決定を個々の状況に応じて行う仕組みのために導入している。特に、要救助者全員のマクロな救助状況を表現するために用いられる従来の救助シミュレーションと異なり、住民の避難行動時の意思決定の影響を救助シミュレーションへのインプットとするため、個々の住民の避難時の選択が最終的にどのような結末となるのか、住民ごとの個別的な問題として把握できるように工夫している。

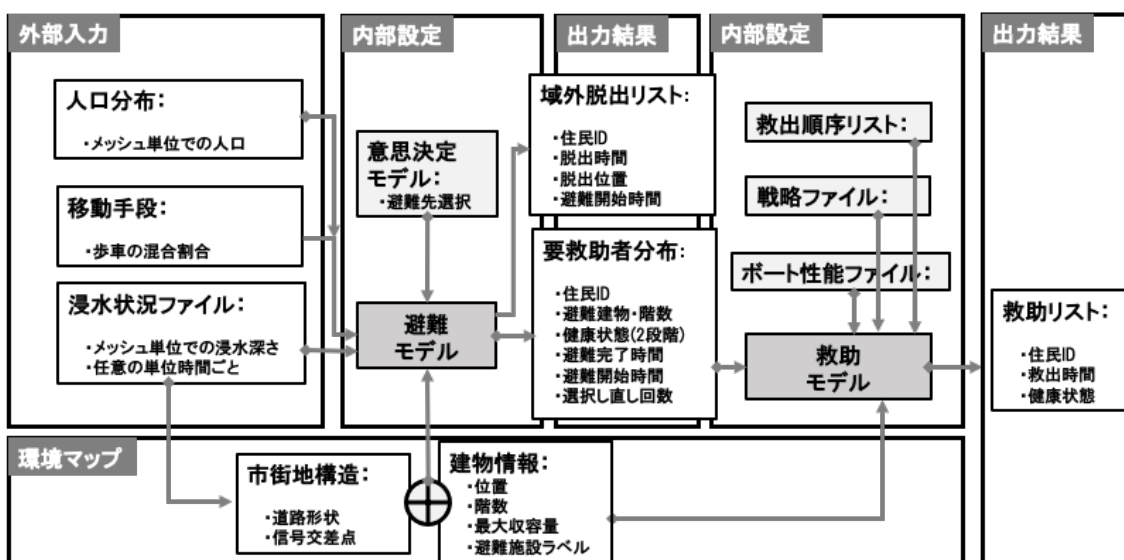


Fig.4-6 避難・救助の連続シミュレーションの流れ

4.3.2 各種計算条件の設定

a) 建物情報

避難時において避難施設の位置や住民が滞在する建物の階といった情報は、避難の判断において重要である。そこで、江東デルタ地帯内の建物の位置、高さや床面積については、Plateau[5]の3D建物データから作成した。また、避難警報時に開設される避難施設の位置を、江東区及び墨田区が公開している避難場所情報から設定した。Fig.4-7が示すように、当該地域内に避難施設が分散されており、どの位置からでも半径約500m以内の距離に避難施設が設定されている。

建物ごとの階数や避難容量については簡易的に設定し、前者は建物高さを3.5[m]で区切って階数を求め、後者は避難収容量としての概算値[6]である2.15-3.98[m²/per person]を参考に、一時的に生活する上で負担の少ないように、一人あたり4m²の床面積が割り当てられるものとした。その際、浸水の恐れがない3階以上を避難用の領域とし、避難施設ごとの避難者の収容上限量を決定した。住民が実際に滞在できる施設内の範囲は、上記の床面積から階段等の滞在不可領域を除いた部分であるが今回は考慮しないこととした。

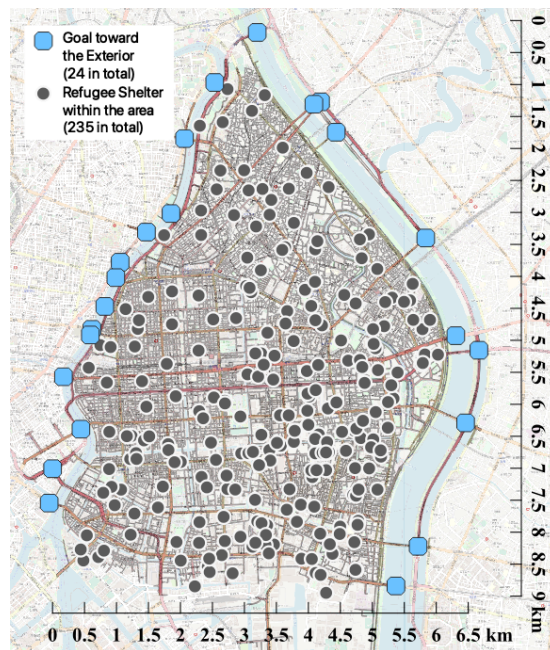


Fig.4-7 江東デルタ地帯内の避難施設と域外避難への出口位置

b) 住民の初期配置

市街地で日常的な生活を送っている住民は、主に避難警報を受けることで避難の心構えをする。その際、避難先の選択について検討する場合、付近の避難所の有無やそこまでの距離といった住民個人の位置を中心とした判断材料を獲得しているといえる。

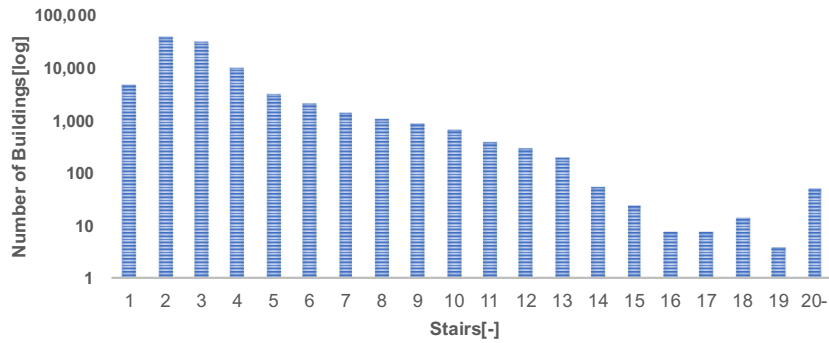


Fig.4-8 江東デルタの建物の高さ分布:

浸水深 5m 以下が想定される住民が滞在できない 2 階建て以下の建物が約 45,000 棟

こうした背景から、より現実的な住民の配置シナリオを想定することとする。具体的には、市街地内の住民数や住民の分布状況については、携帯電話の位置情報に基づく人口分布データ[7]から平時の昼間における一般的な住民の配置を決定した (Fig.4-9)。また、当該データの属性により、あるメッシュ内にいる人が江東デルタ地帯内に自宅がある人か、それとも江東デルタ地帯外からの訪問者であるか、その比率を求めた (Fig.4-10(a))。当該地域の住民であるかどうかで、この地域が浸水するとの警報をうけた際に起こす避難行動が異なると思われるため区別することとした。さらに住民ごとの道路歩行者、車両利用車、建物内滞在の割合は、パーソントリップを元に調査された既存の報告[8]を参考に入力している。

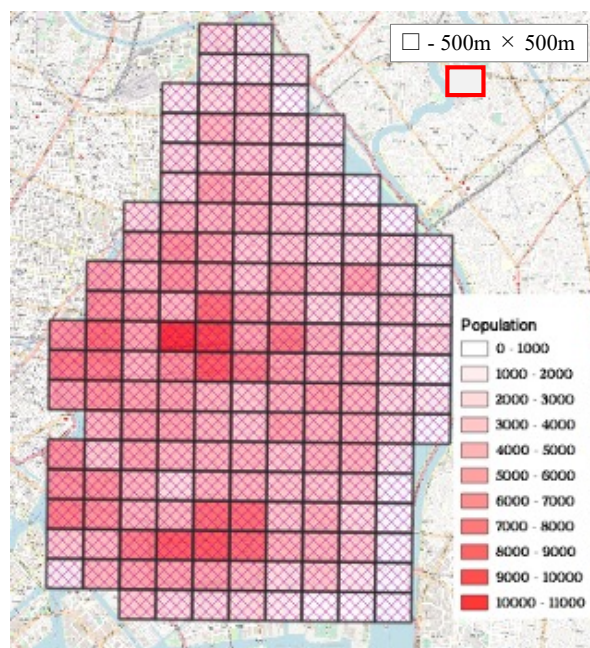
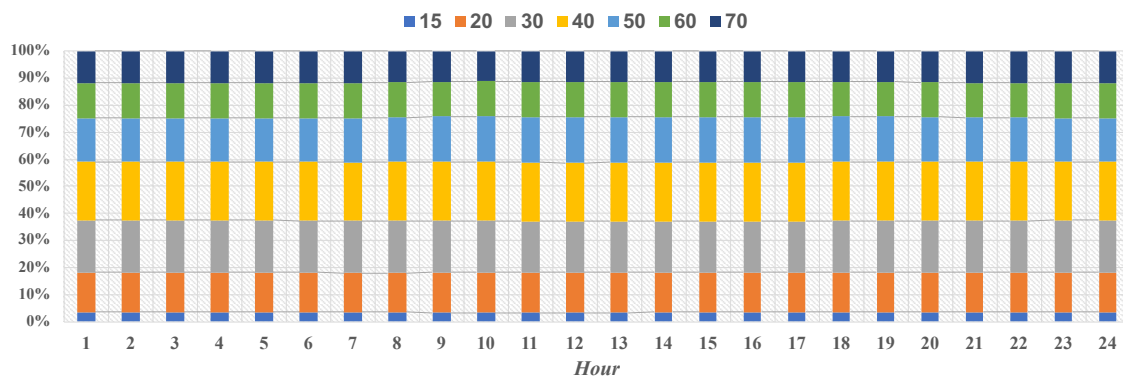


Fig.4-9 モバイル空間統計[22]に基づく昼間人口分布

加えて、救助活動での戦略の検討材料や、住民ごとのマイクロな課題を追求できるように、年代別の人口分布データにより、地域メッシュ内の住民について一定の割合で年齢の属性を付与している。Fig.4-10(b)に示すように、当該地域は内外での人の移動が多いものの、地域内に滞在する年代別の人口割合は時間帯を問わず等しく、同じような属性の人々が入れ替わり出入りしていると読み取れる。地域内人口の年代別内訳は、15歳前後が3%、20代が14%、30代が20%、40代が22%、50代が17%、60代が12%、70代が12%という構成となっている。今回の救助活動では、10代と60、70代の住民(全体の約30%)を優先的な救助対象とし、それ以外の年代の住民よりも救助が早まるように戦略を立てる。



(a)



(b)

Fig.4-10 一日の地域人口の割合(a)及び年代人口の構成比の時間変化(b)

c) 避難者の意思決定モデル

ここでは住民の避難行動もとい避難意識の表現方法を説明する。避難における意思決定構造は大変複雑であり、災害状況への簡潔な状況認識だけで住民の避難行動は説明できない。例えば被災のリスクを認知していても、身を護る避難行動をとらないというパラドックスが問題とされている。

こうした現象を解明するために、しばしば Rogers による防護動機理論[9]の枠組みが引用される。これは、リスク回避・軽減行動を分析するための心理モデルであり、リスクへの脅威とその対処という評価指標により「防護動機」が形成されると仮定している。柿本ら[10]は、防護動機理論を用いて、自然災害リスク認知のパラドックスについて、包括的な理解を試みている。災害からの避難行動では、リスクの認知とともに、避難の意思形成と実際のアクションにつなげるという構造が必要だといえる。また、Mileti et.al [11]や三上[12]は、避難行動を災害認知に端を発する連続的過程として見立てており、リスク認知に基づく避難の意思決定と避難行動というモデルを考案している。

このように災害発生後住民が状況を認知し、実際に避難行動を取るまでの一連のプロセスは実に多様であり、複雑な様相をしている。もちろん、こうした避難行動を適切に記述し、避難モデルとして導入することで、避難行動が引き起こす影響を評価できるようにしたい。しかし、個々の避難行動を総括し、一般的な避難行動を記述することが困難であり、また複雑なモデルを適用したことによる解釈の困難性を回避するため、ここでは避難行動を簡略的に提示することとする。

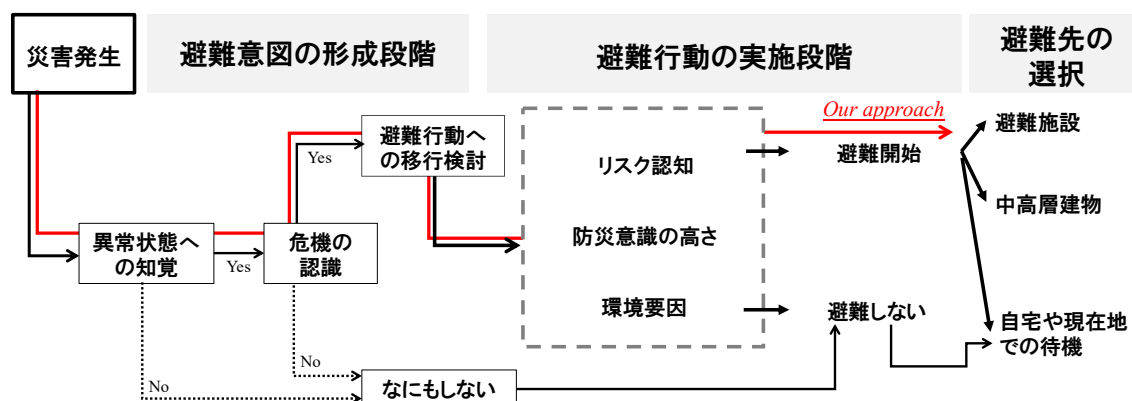


Fig.4-11 本研究で想定する住民の避難意思決定プロセス

そこで本研究では避難行動の一要素として、避難先の決定に着目する。災害発生を認識した住民の避難先については、Fig.4-11 に示すように、多くの要因によりその選択が異なってくる。特に、避難場所そのものへの情報把握や災害発生時の居場所によって、避難の選択先も限定されてくる。しかし、避難の行動選好が異なれば、避難先として選択される建物も変わるはずである。こうした避難意識の違いが、避難行動時の住民の避難状況を超え、救助活動のパフォーマンスに対してどのような影響を与えるか把握することとする。

避難行動を起こすまでのためらいなど、実際に行動を起こすまでの時間が避難の質を変えることも多い。そこで、住民が避難を知覚する時間帯を、災害状況をもとに設定する。住民

が避難行動をとるには、災害の発生そのものを知覚する必要がある。そのための手段として、携帯アプリやテレビ、ラジオから得られる避難情報をあてにすることができる。

こうした情報は、行政の警報発信に基づいて行われるのが一般的である。そして、行政の警報発令の判断時期については、管理する河川ごとに一定の基準[13]が設けられている。今回対象とする荒川下流部では、岩淵水門付近の水位を元に警報の発令が検討されており、本シミュレーションでも氾濫シミュレーションの結果を考慮した。

そこで、今回扱う洪水氾濫シミュレーションの結果から、堤防崩壊後に市街地への浸水が開始されるタイミングを基準に、その 5 時間前に河川の水位が避難判断水位に達し、また 3 時間前に氾濫危険水位に達していた。特に行政から警報を発する際、氾濫危険水位に達した時に老若男女問わず住民全体に向けて警報が出され、避難を促す計画となっている。

実際に避難行動を起こすまでの時間としては、片田ら[14]の住民への避難意識調査を参照した。この報告では、江東デルタ地帯の東側で、同じく荒川による浸水被害が懸念されるエリアにおいて、地域住民へのアンケートを通じて当該地域住民の避難意識を調査している。調査地域の地理的な近さや脅威とする河川が同じことから、片田ら[14]の報告にある住民の避難意識をモデル内に表現した。まず、前述の避難指示警報を受けた段階で避難を決意している住民が 70%と大多数であることから、ここでも堤防破堤前の 3 時間前に発せられる避難指示警報を受けて、住民全体が避難を検討し、準備を始めるものとした。この 3 時間前という期間は、参照文献[14]で用いられている時間とも大きく違いはなかった。

さらに、避難する住民の多くが警報発令を受けてから 30 分から 1 時間をかけている。そこで、住民ごとの避難行動開始時間を上記の時間範囲内の乱数で設定した。もちろん、避難行動が始まるまでには、複数の意思決定プロセスを経るとされる。ただ、今回は個々のプロセスにかかる時間については計算せず、1 つの大きなプロセスとしてみなすこととした。つまり、この時間には避難準備などの避難開始に至るまでのプロセス全体に必要な時間をまとめて考慮している。またその避難先の選択として、アンケート結果[14]を参考に、Fig.4-12 に示す条件で行われるとした。Fig.4-12 にあるように、住民の中には域外を目指した避難行動をとる者もいるが、すでに十分な高さの建物にいる場合、そもそもその場から避難しないという選択肢も取りうる。実際、今回洪水発生を想定する荒川を管轄する荒川区では、堅牢な建物で 3 階以上に住む住民には自宅待機を要請するように対応方針を決めている[15]。そこで、3 階以上に住む住民は避難しないことも可能とし、他方で自宅にいたとしても 2 階以下の場合には必ず避難行動を起こすこととした。

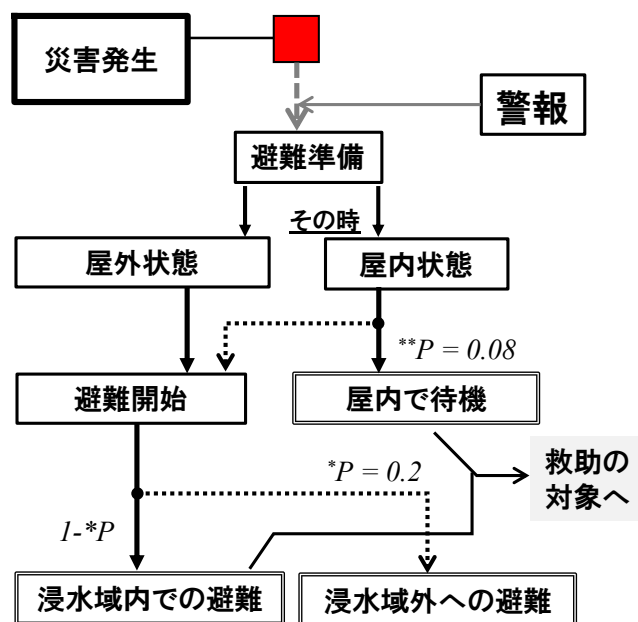


Fig.4-12 避難場所の選択モデルのフロー

避難シミュレーションの主要要素を次にまとめる。

1) 住民は、災害の発生を知覚後、一定時間内に必ず行動を開始し、早期の避難完了を目指す。住民はそれぞれの現在位置と近辺の各避難場所との位置関係を参考に、避難先決定モデルに基づき避難行動をとる。

2) 住民の避難開始時間については住民ごとに設定する。ただし、既に建物内の上層階に滞在していた場合、あえて避難しないという選択肢も考慮する。こうした行動を垂直避難とこの研究では定義する。

3) 域内建物への避難については、到着した順番に応じて最上階から室内に避難するものとする。その際、浸水の恐れがない3階以上に避難するものとし、後続の避難者の到着を考慮し、建物の最上階から避難者を収容するものとする。

ただし、到達した建物が避難住民の容量上限に達していた場合には、改めて避難先を決定し直し行動する。また、域外への避難については容量の上限なく避難が達成されるとする。

d) 救助方針

次に救助の方針について説明する。今回、救助の方針については事前に想定した一定のルールに基づくものとした。本来、救助活動時の戦略は対応前の被災状況に応じて、その都度変えるべきである。しかし、住民の避難意思に依る浸水域内での避難状況がその後の救助活動プロセスにどのような影響を見るのかが目的であるため、救助方針の違いによる影響を考慮しないためにも救助方針そのものを固定した[16]。

救助活動内容としては、消防隊や自衛隊といった公的機関によるボートでの孤立住民の

救出・搬送としている。本来は、住民の捜索という段階も活動内容には含まれるが、孤立住民の配置と救助時間の関係性に着目する上で、捜索活動を考慮せず、活動プロセスを簡略化している。今回想定する浸水規模においては、事態への対処のために自衛隊への救助要請が必要となる。実際の防災計画では、都道府県知事が大臣に要請することで自衛隊が派遣されるという手続きとなる。

今回の場合、市街地が浸水してから救助活動が開始されるのまでの3日間の間に、救助要請や各種の準備が行われ、救助リソースが当該地域に結集するものとした。ただし、とりあえず住民を搬送するという作業だけに焦点を当てているため、救助隊の役割に区別をつけずに、同じ活動を行うものとして扱う。もちろん、より複雑な作業や医療行為などが必要なケースでは、救助隊ごとに役割を区別することも検討できるが、今回はそこまで救助工程を考慮しない。

その救助方針を策定するために、新たに住民の避難状況の区別を行い、a)特定の避難場所への水平避難をとった住民と、b)あえて滞在建物からの移動をしなかった垂直避難の住民とした。a)については、特定の避難施設へ集合している住民達であり、b)については領域内の一般的な建物へ避難している少数構成の住民グループであり、領域全体で分散している。こうした当該領域の避難者の分布を考慮して、救助活動を実施するものとする。

その際、高齢者や子供の救助優先度の高くし、該当する住民が多く取り残されている建物から優先的に救出に向かうものとする。また、住民の救出後は、前進拠点に一度搬送する際、直前に訪問した避難建物にまだ住民が残存している場合には、最優先にその建物へと訪問するものとする。

これらの条件により救出の優先度は以下のような序列となるよう想定している。

- 1) 避難施設内の高齢者や子供
- 2) 避難施設内の住民
- 3) 上記 b)で孤立する高齢者や子供
- 4) 上記 b)で孤立する住民

ただし浸水域内での分散救助を前提とする各救助部隊の活動状況によっては、上記の救出序列を必ずしも遵守するとは限らないが、概して上記の救出序列に近い救助結果になるものであると補足する。

e) シナリオ設定

こうした避難意識をもとに、住民が抱く避難先の決定方法によって生じる避難状況を表現する。特に、今回の研究では、避難意識の違いがその後の救助活動時にどのような問題を生じるかを考察することが目標である。そこで、避難先の選択モデルから2つのシナリオを

比較対象とする。A) 住民は、避難すると決定した際の現在位置から最近傍の避難施設へ避難する。B) 住民は、避難すると決定した際の現在位置から、浸水域外側にある最近傍の避難施設へ避難する。

A)に関しては、住民の身を守る行動として最も早く安心できる行動である。B)では、一番近くの施設ではなく、あえて浸水域外に近い建物へ避難し、避難完了までの時間を延ばすという被災リスクを高める行動である。これらが住民の共通の避難施設である場合の避難状況をシミュレーションで再現し、その後の救助活動へのインプットとする。また、地域全体の避難意識として、1)浸水域外への脱出率や2)避難しない住民の割合を代えた3つのCaseを加え本シミュレーションで使用するシナリオとした(Table.4-3)。ただしシミュレーション全体のなかで、住民は目的地への最短経路をとるものとした。

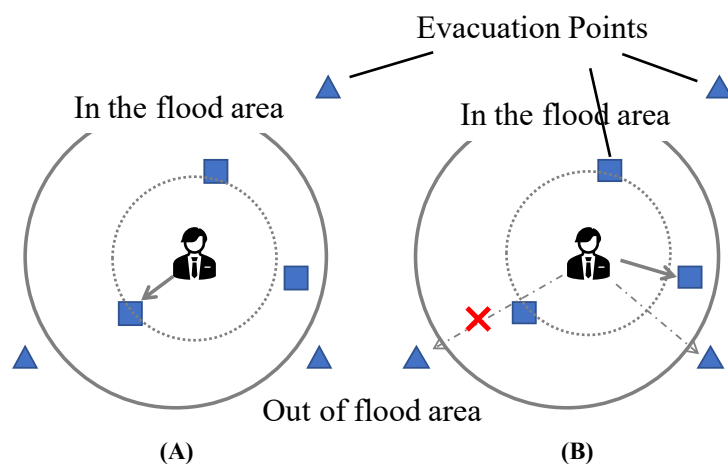


Fig.4-13 避難先選択モデルにおける選好パターンの違い

Case ごとの具体的な説明として、

Case1: 域外避難住民の割合(20%)や非避難住民の割合(8%)を過去のアンケートデータ結果を直接引用し、避難行動としては住民の避難開始位置から最近傍の避難施設へ避難する(A)とした。

Case2: Case1 と比べ、避難先の施設に強い選好がある場合を想定した。住民の避難意識の分布は変えず、より域外に近い避難施設を目指す選好性があるとした(B)。

Case3: 地域内の全住民が浸水被害を受けない外部エリアに避難するケースである。各住民は、最も早く外部へ脱出できるルートを取り、その後の救助を待つ必要がなくなる。

Case4: Case1 と比べ、非避難率の割合が高くなっている(30%)。総じて、避難施設に集まる住民が少なくなり、一方で各建物への住民滞在数が増えるため、避難完了後の住民配置の分散性が高まる。

Case5: Case1 と比べ、非避難者が存在せず、必ずどこかの避難施設に向かうものとする。そのため、避難完了後には特定の建物だけに住民が集中避難している状況となる。

Table.4-3 ケーススタディでの各操作変数のリスト

Case No.	1	2	3	4	5
*浸水想定範囲外への脱出割合	0.20	0.20	1.00	0.20	0.20
**自宅(滞在建物)から避難しない住民の割合	0.08	0.08	0.08	0.30	0.00
避難先の決定シナリオ	A	B	-	A	A

4.3.3 住民の避難シミュレーション

4.3.2 項 b)で導入した住民の初期配置から、水害時の避難状況を予測する。まず、ケースごとに自宅待機による垂直避難をとった住民を除く全ての地域内住民の避難の完了率の時間推移を Fig.4-14 に示す。また、収容限界量に達した避難施設に到着時した際の、避難施設の再選択回数を Fig.4-15 に示す。

まず Fig.4-14 に関して、避難先の選択モデルが異なる Case1 と Case2 では、避難先の決定に選好意識がある Case2 の場合が、避難完了にかかる時間が多く必要となった。これは、避難開始時に最近傍の避難施設を選ばず、浸水域外への近さを考慮した避難行動となったため、選択した避難施設への到達が遅れたと考えられる。また Fig.4-15 にあるように、地域内の特定の避難施設へ住民の選好が集中したために、一部避難施設の容量が上限に達し、住民の再移動数が極端に増えていることがわかる。

避難行動全体をみると、初期から中期にかけては、域内の建物避難においてケースごとの差が出ているが、他方、避難行動の後期は、歩行移動での域外避難に時間を要する住民がまだ避難を終えていないため、避難完了率の両ケースの差が小さくなっている。

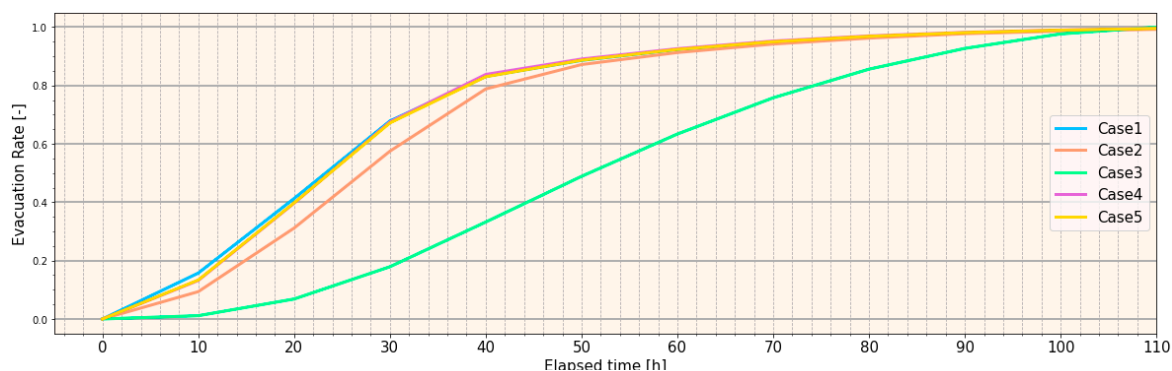


Fig.4-14 ケース別住民の避難完了率の時間推移

次に、非避難率の違いによる Case1,3,4 の避難結果については、特に避難先の選択意識に差異がないため、地域の住民の避難完了までの推移に大きな差は見られなかった。しかし、Fig.4-15 にみられるように、避難行動をとった住民数の多さに応じて、Case5,Case1,Case4 と避難施設の選択変更回数も少なくなっており、同じ避難完了率の推移となっても、地域内で移動する住民の数によっては、避難完了までの移動量が増えていることがわかる。

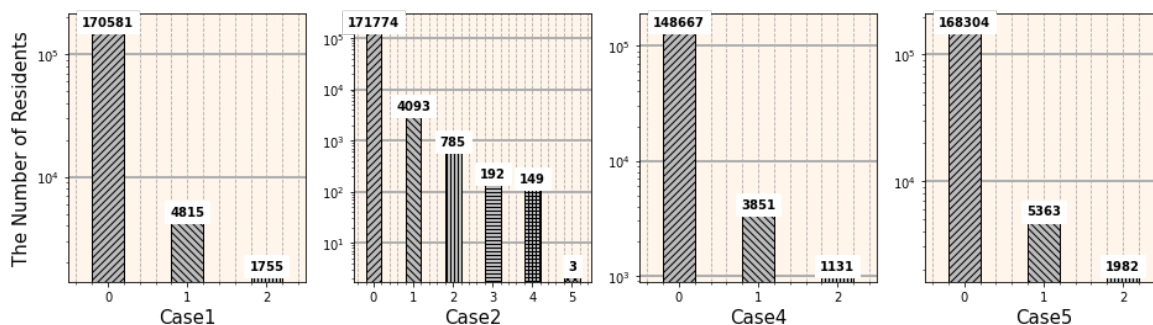


Fig.4-15 ケース別住民避難における避難場所の変更回数

最後に、全ての住民が域外避難を試みる Case3 は住民の避難完了率が一番遅い推移となった。域内に分散して配置されている避難施設ではなく、域外への脱出までの移動距離は総じて長いため、避難をおえるまでに多くの時間がかかる結果となったといえる。避難後の救助待機時間が必要ではないが、屋外での避難時間が長いほど、住民が浸水による直接の被害を受けるリスクも高まる行動であるといえる。

4.3.4 住民避難後の救助シミュレーション

前節で得られた避難状況をもとに、浸水域で孤立している住民のボート救助のシミュレーションを行う。

ボートでの救助活動では、領域周辺部に設置した前進基地からの救助作業を実施する。当該領域に投入されるボートリソースとしては、文献[17]で調査されている当該領域の管轄組織の保有するボート数を参考に、13 拠点に各 150 個とした。この文献では、今回の研究対象領域と同じエリアを扱っており、浸水対策時のリソースや活動プロセス、活動ごとの必要作業時間を、業務に関わる当事者へのヒアリングを通してまとめている。リソースの配置計画においては、住民の避難状況ごとに検討すべきであるが、簡単に記述するために拠点ごとに平等に配置させている。また、1日の作業時間については、1日24時間での作業時間としている。ただし、実務上では昼間の活動を前提とした12時間を想定するべきであるが、ここでは要救助者の分布の差異による救助作業工程の変化を可視化することを目的とするため、ここでは簡易的に活動時間の制約を考慮しなかった。

救助のシミュレーションの結果を Fig.4-16,4-17 に示す。まず、Fig.4-16 では、避難先決定モ

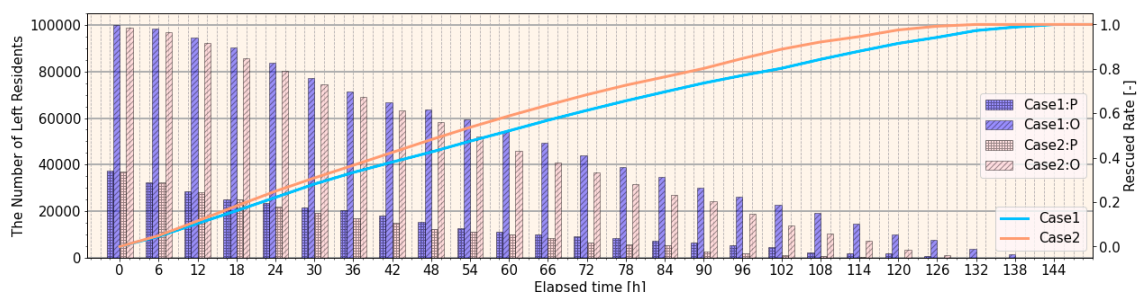


Fig.4-16 要救助者の救助率と避難住民と非避難住民の残存人数の経時変化:

凡例の“P”は優先度の高い要救助者，“O”はそれ以外の要救助者を示す。

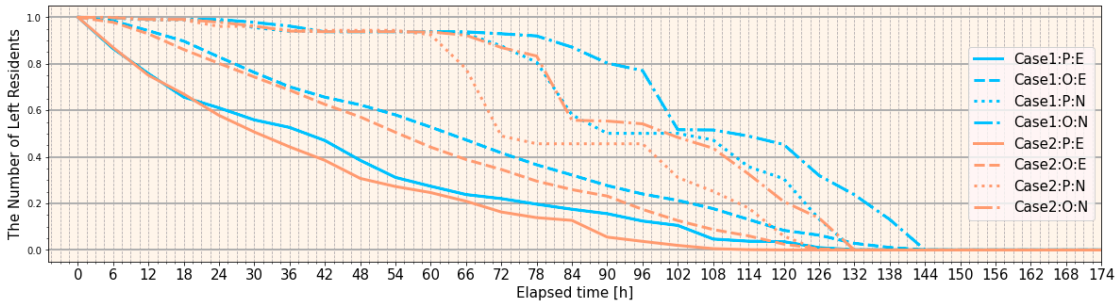
デルの違いによる Case1,2 の救助完了率の推移を示している。前節の結果では、Case2 の方が住民の避難完了までに要した時間が多かったが、救助活動という視点では、Case 2 の方が比較的早く終わることができている。これは、域外に近い避難施設への避難行動をとる傾向となった Case2 が、結果として救助活動時の前進拠点近くに避難する住民が増えたことで、ボート救助活動時の移動時間を削減したことにつながったと考えられる。

また、Fig.4-17(a)に示すように、Case2 では避難施設に避難した住民数が増えているにもかかわらず、避難施設内の要救助者の救助完了率が改善されている。これは、水上での移動コストに対し、住民が浸水域内で分散して救助待つより、避難施設などに集中して救助を待つ方が、救助活動上では有利であったためと考えられる。

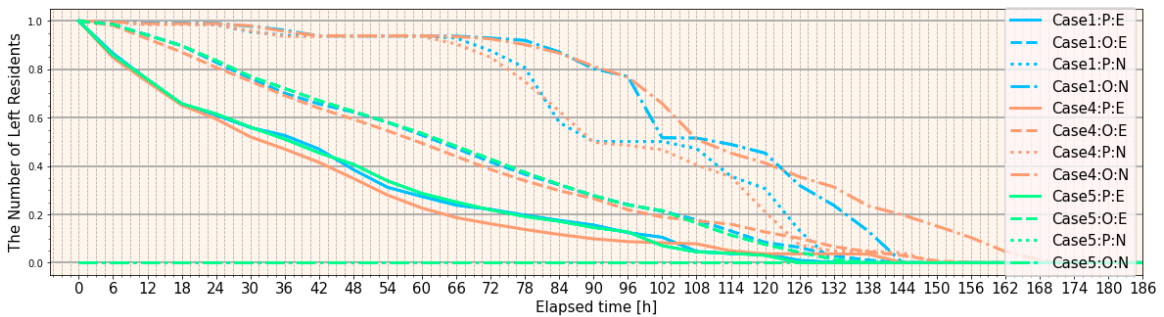
逆に、避難施設での待機住民数の割合が増えたことで、自宅等の避難施設以外で救助を待つ住民の救助は相当遅れる結果となっている。救助の優先順位が決められることで、一番優先順位が低い住民の救助プロセスに大きな影響を与えることとなり、避難しないことを選択した、特に健常者の救助は、他の属性の住民と比べて救助されるまで長い時間を待たなければいけなくなっている。

次に、非避難率の違いによる Case1,4,5 の救助結果については、特に救助優先度の低い自宅待機の健常者の救助時間に大きな差がでていいる。避難率が低い Case4 では避難施設へ避難した健常者の救助時間において、Case1 との変化は小さいが、避難していない健常者の救助時間が長引いている (Fig.4-17(b))。これは、非避難者の数が増えたことで全体の救助時間が伸びたことに加え、分散して分布している非避難者の救助における移動コストが加算されたためといえる。逆に、すべての住民が非難した Case5 では、他のケースと遜色のない効率で避難施設からの救助が遂行されている。避難施設への避難者数が増えていることを考慮すれば、Case5 の救助効率は最善であったといえる。救助の観点では、子供や高齢者等の優先的な救助が必要な住民を、効率をさげることなく救助できており、健康的な住民の観点からは、どのケースよりも早く救助される確率が高まるため、安全を確保するという目的に一番適

した避難状況であったといえる。



(a)



(b)

Fig.4-17 救助の優先度別の救助待ち住民数の時間推移:

凡例の“P”は優先度の高い救助者，“O”はその他の救助者を示す。

また，“E”は避難した住民，“N”は避難しなかった住民を示す。

4.4 議論

前節までのプラットフォーム上でのシミュレーション結果を俯瞰し、長期浸水の発生に備えた住民の避難計画や避難行動の見直しについて議論する。主な視点として、1)救助活動下の住民への負担として救助トリアージの発生や、2)救助活動の観点から見た住民避難状況の評価、及び住民の避難行動の観点から見た住民避難状況の評価、3)最後に、相互の災害対応の関係性について取りあげる。

4.4.1 救助トリアージの発生

まず救助リソースを共有する住民同士の関係性に潜むリスクについて述べる。大規模な水害被害が想定される場合、救助リソースが不足するという事態は避けられない。そこで、救助活動として、高齢者や子供、要医療者といった住民に、限られたリソースを集中的に充てる優先的救助を検討する必要がある。救助を待つ期間中の住民の健康状態を考慮すれば、これらの属性の住民に最大限配慮することは「正しく」見える。一方で、実務では住民

や行政からの要請を受け、必ずしも「正しい」活動を取られないという実状がある。4.2 節で見たように、住民からの強い救助要請を受けて、事前の戦略とは救助行動を取ることが本来の優先的救助という目的を損ないかねないと示した。

しかし、この行動そのものが批判を受ける行動でもないはずである。研究や事前計画の中で追求される合理性では、現場の問題として発覚するトリアージ問題を捉えきれない。昨今発生している COVID-19 での医療の対応にあるように、被害が大規模になる程、誰を助けるべきなのか、倫理的な課題としてのトリアージが発生する[18,19]。そうした問題に直面した際、どのように行動することが正しいのか一概に決定できず、徹底的な行動方針を崩すことによる救助のマネジメント能力の低下につながる。優先的対応を想定した事前計画が、現実問題として発生している救助・救急トリアージの発生を想定されていないとすれば、巨大災害発生時の災害対応の困難さの重要な一面を見落としている可能性がある。り大規模な救助活動となる場合には、こうした健常者の例外的な対処の所在が、救助活動の目的を阻害する要因になると想定される。何を優先して救助活動を行うかは、各主体の決定によるところだが、救助活動マニュアルなどに記載された一貫した優先的な対処のルールベースでの行動規定では捉えきれない問題の存在が明らかになった。

そして、やはり住民自身にもこのリスクを周知する必要がある。浸水域で救助を待つ住民の視点にたてば、一刻も早く救助されることを望むはずである。しかし、救助を待っている住民同士は、お互いに救助リソースを取り合う関係でもあることを認識すべきであろう。例え同じ避難場所にはいなくとも、離れた場所に顔も見えない住民が同じく救助を待っている可能性がある。そのような状況で、救助優先度を高くすることで、本来早く救助される必要のある高齢者や子供、要医療者の安全を脅かす可能性があることを理解しておく必要があるだろう。1) で述べたような浸水域での救助活動にかかる強い制約の存在が、その救助を待つ住民の意思決定が、他の住民により大きな影響を与える関係性が構築されてしまっているのだ。

4.4.2 住民避難状況と救助活動の関係性

まず救助活動時における住民の避難状況を評価する。避難場所の選択意識の違いに基づく 4.3 節の Case1,2 では、救助完了率に差が出ていることがわかった。特に、救助活動の拠点に近い避難施設へ避難する傾向となった Case2 の方が、救助活動パフォーマンス上では有利であった。水上での移動という地理的制約やボート容量の上限という機能的制約の強い浸水域内の救助活動において、住民の要救助者数という数量だけでなく、どこに避難しているのか、どの程度集中して避難しているのかといった、地理的な避難分布は重要な要素であるといえる。極端な言い方をすれば、救助活動時に有利な住民の避難状況というものは、浸水

域外になるべく近く、かつ全体として少数の避難施設へ集中している場合であろう。

また、救助を待つ住民からすれば、避難施設への避難ができている方が、先に救助される可能性が高くなっている。それは、救助の戦略上避難施設への救助訪問が優先されるためであるが、避難施設への避難とそうでない場合の救助時間の差は、それぞれに滞在する住民の数によって変わってくることもわかった。それは、避難施設への避難をした住民が多いほど、結果避難しなかった住民の救助がさらに遅れるということであり、その逆もしかりである。

また救助上の優先順位付で重要とされる住民の体調・年齢といった属性による救助時間の差も変化する。住民全員が避難施設に避難していれば、住民の属性による救助時間の差はさらに縮まることとなった(Case5)。子供や高齢者、あるいは要医療者等、劣悪な浸水環境下での救助を待つ時間的な猶予が短い住民が救助対象に見込まれる場合、こうしたトリアージ的戦略の必要性がでてくる。その戦略の裏側で、救助の優先順位の低い属性の住民が、長い時間を電気や食料が不足する環境で待つこととなるため、避難完了時にどこに滞在するかは、避難後の住民の生活状態を大きく影響を与えているといえる。

次に、住民の避難行動の観点から見た避難状況の評価を行う。まず、避難先までの移動距離が短いほど、住民の避難完了が達成されるまでの必要時間が短縮された。今回のケーススタディで扱った江東デルタ地帯には、数多くの避難施設が分散してあるため、地域内のどの位置からでも避難施設までの避難距離が長くなることはなかった。そのため、あえて遠くの避難施設を選ぶ場合(Case2)、域外へ脱出を選ぶ場合(Case3)では、避難を終えるまでの時間が長くなっている。

また、避難先施設の選好が地域全体で一致する場合(Case2)や避難をする住民の数(Case4,5)によって、スムーズな避難活動が阻害されるケースもでてきた。避難施設の収容量上限を考慮すれば、一部の避難施設に住民が集中して向かうことで無事に避難施設に入れない住民が出てくることは避けられない。避難施設へ収容されるまで幾度の移動を繰り返せば、それだけ移動の手間を生むとともに、疲労を蓄積することとなる。本研究では考慮していないが、疲労の蓄積による移動速度の低減効果も見込めば、移動距離を長くすることは、特に高齢者等の避難行動を危ないものにしてしまうだろう。

こうした議論から、避難行動に関する多くの既往研究の知見である、住民の早期避難の必要性は頷けるものであり、そのために分散避難等の対策が求められることもできる。たしかに、いつ河川の堤防が崩壊するか不明な洪水氾濫において、屋外での避難時間が長くなることは被災リスクを高める結果となる。しかし、その後の救助を待機することを考えれば、少しでも域外に近くに避難することで救助されるまでの時間を短縮できる。住民の避難行動として、一時的な安全を確保する従来の避難行動と、救助を見据えた避難行動では、その行

動の在り方が異なっているといえる。

4.4.3 災害対応の相互の関係性

ここまでで判明したことは、避難時において生命を第一に守るための避難行動と、その先の救助を見込んだ際の避難行動のあり方が異なるということである。前者では、住民に早期に、かつ分散して避難すること、そして無理には屋外に出かけないように心がけることが重要である。後者では避難施設に集中して避難することが求められ、そして健康なのに避難をしなかった住民がより負担を強いられる結果となった。これらは、水害対応時における異なる活動プロセス内で、住民に要請する避難行動が異なっていることを示し、かつ今回の結果であれば、利害が真逆の避難行動が求められるジレンマ構造となっていることが判明した。

さらに今回のシミュレーションでは、住民個人がこのジレンマ構造下でどのような影響を受けているかが新たに判明した。例えば、住民の避難意識として、域外や避難施設へ避難しようとする住民の割合が地域で高いと、避難をしなかった住民が長く劣悪な環境下で過ごすという損を被る。しかし、同じ避難先選好をもつ住民の割合が多いほど、避難時間が多くかかり、避難上の被災リスクを高める結果となり、避難しないという選択の優位性も高まる。まさに、共有地のジレンマのように、地域全体での住民の避難意識と、住民個人個人の避難意識の関係性からさまざまな課題が生じていることが、シミュレーションの結果から読み取れた。

4.4.4 総括

ここまでのまとめとして、長期の浸水が予想される水害への対策では、住民の避難行動と救助隊の活動の個別への対策だけでは不十分で、異なる目的意識を持つ、異なるステークホルダーの複数の活動から横断的な視点での解決が必要であるということだ。その点について、次に挙げる2点が本章からの新たな知見であると考えられる。

まず1点目に、避難時のみに焦点を当てた正しい避難行動と、複数の災害対応を通して得られる良い避難行動結果は異なるということだ。

住民避難の最大の目的は、早期に避難完了させるということであろう。確かに、住民の安全を確保させるという点では、できるだけ早く避難を完了させるために、住民への平常時からの意識改革や非常時の情報発信に注力することは重要である。しかし、浸水域内での避難生活のように、一度避難を終えた後も住民自身に負担がかかる場合、その後どれだけ早く救助されるかということも住民の安全・健康の面では無視できない要素である。

そのため、仮に住民自身がいち早く安全を確保したいと考えている場合、早々に避難を終えるという目的に加えて、その後早く救助されるという視点も必要となるだろう。特に早期の避難行動だけでなく、どこに避難したかといったロケーションも目的に含む必要がある

と示した。これまで住民の避難行動に限定して述べられた知見も、その後救助活動を含めて議論すれば、正しい避難行動の定義も変わりうるといえる。気候変動によって激甚化が想定される水害への対策として、地上での活動よりも特に効率という面で厳しい活動を強いられるボート救助が必要な場合にこうした問題がより大きな意識しなければいけないだろう。

2 点目に、住民個人が避難行動を決定する際、1)の事実とともに、地域全体で他の住民が抱えている避難意識を把握する必要がある、ということである。

これまで避難の必要性については、住民個人或いはその住民に近い人の安全を確保するという観点で議論されることが多くあった。しかし、避難の先の救助活動では、それまでに出会ったこともない他の住民と否が応でも関わりを持たなければいけない。例えば[3]にあるように、個人の主張が地域内の赤の他人の救助活動に悪影響を与えうるし、今回のように、地域内の別の住民の避難意識とすれ違うことで、その人自身が損をするという構造があった。浸水域で救助を待つ住民は、お互いに救助リソースを取り合う関係性となり、その相手はすぐ側にいる他の住民であり、そして別の場所にいる、直接顔も見られない住民でもあるのだ。水害時の災害対応では、他の災害以上に地域内での、会ったことのない住民同士間でも合意形成が成り立たなければ、住民個人及び地域全体で被害が拡大しうるだろう。

地域住民全体の意思決定が、個々の住民に悪影響を与える現象については、これまでいくつかの報告が挙げられている[20-22]。今回の避難施設の容量問題[20]もその一つであり、災害対応時の課題として取り上げられることも多い。これらのケースは、避難時に生じる問題であるが、本章では新たに避難との救助まで含めた災害対応のなかに内在する新たなジレンマ構造を発見した。救助までも見込んだ避難行動の決定では、住民個人のもつ局所的な情報だけでなく、周囲の住民がどのような避難行動を決定したのか、全体を俯瞰した状況判断が重要になってくる。

行政が住民の避難計画や救助計画を策定する際に、住民の避難意識を把握し、避難状況を想定しておくことは大事である。しかし、住民自身もまた、自身の安全を確保するためには、同じ地域で生活する住民の避難意識を把握することが重要であり、救助状況を踏まえた避難行動の意思決定をしていく必要があるだろう。

もちろん、地域内で避難に関する合意形成ができることが望ましいが、必ずしも強固な地域コミュニティを築けるとは限らない。ソーシャルキャピタルという観点から地域コミュニティの形成と、その地域の防災能力を評価した研究[23]では、都市部と町村部ではソーシャルキャピタルに差があることも指摘されている。今回のように移住の多い大都会であれば住民間での合意形成が難しいと想定できるため、避難状況に対する個々人での意思決定に頼らざるを得ないだろう。

こうした地域性をも踏まえ、避難行動を改めていくことが重要であろう。つまり、住民の個人が選択する避難行動が、地域内の他の住民の救助状況に影響を与えるという事実と、そして今度は地域内の他の住民の避難意識がその人の安全に関わるという因果関係を理解することが求められる。例えば、救助はされるだろうと考える住民が多い[24]という背景に対し、避難しないことを選ぶということが真にどのような結末を迎えることとなるのか、あるいはそれが有効なのはそのような状況であるのか、慎重に検討していくべきであろう。

逆に言えば、住民個人の避難意識を正しく変容できれば、子供や高齢者といった優先的に救助されるべき住民を多く助けることにつながり、またその人自身も早く安全を確保できるだろう。また、行政としても態度変容を引き起こすための情報ナッジが適切に機能すれば、避難時のみならず、その後の救助活動のパフォーマンスを改善できると示唆できた。

水害の対策を検討する行政側の視点であれば、水害時における住民の避難行動と、そして救助活動に関わる社会課題は、地域ごとのリスクであるとみなせる。同時に、その地域内の住民個人へのリスクであると、住民自身も受け止める必要がある。こうしたリスク構造下のある水害対策においては、地域課題の解決を直接扱うのではなく、住民の意識改革という個別のアプローチの積み重ねにより問題構造を解消することも検討していくべきである。

最後に、今回、住民の避難行動から生まれる避難状況が、その後の救助活動を経て、住民自身へどのような負担となって返ってくるのかその関係性に注目している。そのため、救助活動そのものの戦略を固定してシミュレーションを行った。実際は、住民の避難状況からボートのリソース配置や救助戦略を検討することで、救助状況をさらに改善できるだろう。

一方で、住民の避難完了後、救助活動へのフェーズ転換にも考慮すべき点が多い。もちろん、何らかの障害により開始時間が遅れることで、住民全体の救助完了がさらに遅れる。また、ボートでの移動時間を考慮すれば、地域内の住民の分布に考慮した適切なボートリソース配置でなければ、救助効率も悪くなるだろう。そして、浸水状況と市街地の構造を照らし合わせれば、そもそもボートでの救助が到達できないエリアがある場合もある。その際には、ヘリコプターといった代替手段が必要であるが、ボートほどの救助効率は期待できない。

このように、住民の避難完了後の災害対応のフェーズ転換においては、住民がどのような避難状況であるか、市街地での活動上の支障は存在しないか、を漏れなく把握し、適切な戦略計画を立て、遂行していくことが求められるだろう。今回、災害対応のこの移行段階については円滑に行われるものとしたが、そもそも移行段階に問題があるケースを想定していくことも重要な視点であると念をおしておく。

4.5 本章のまとめ

今回、長期的な浸水の発生が想定される地域の住民が今後留意すべき避難リスクや検討

すべき避難行動をプラットフォーム上のシミュレーションを用いて把握した。具体的には、救助活動の限界下で住民への負担内容を簡易的な救助シミュレーションで確認し、避難行動の計画内容については住民避難と救助活動の連続シミュレーションにより検証した。それにより、浸水域での救助活動にかかる強い制約により、その救助を待つ住民の意思決定が他住民により大きな影響を与える関係性が構築されてしまっていることが判明した。また、避難完了時の短期的な結果によって評価される避難行動と、救助完了時というさらに長期的な結果によって評価される避難行動は異なることがわかった。それを受け、住民個人がとるべき避難態度の変容が必要で、他の住民の避難意識等地域状況を踏まえたより複雑な意思決定が必要であることが判明した。

今後の展望としては、1)本モデルの拡張、2)現実での活動へのフィードバックである。

まず 1)について、今回は水害に関わるステークホルダーを、住民と救助隊という 2 グループだけ扱った。しかし、実際にはボート救助後の住民の医療機関への地上搬送や、浸水域での排水計画といったインフラ業者といった他のステークホルダーや役割も考慮すべきであろう。上記の内容は、救助の戦略方針の策定に必要な役割であり、また異なったステークホルダーとして連携を要するものである。つまり新たなプレイヤーとしてモデルを設計し、本モデルに加えることでより実態にあった救助状況を再現できるということである。複数のステークホルダーの連携をシミュレーションで表現することで、また水害対応中の各ステークホルダー間の連携に隠れている新たなリスクや、逆に救助活動だけでは解決が難しい課題に解が生まれる可能性があるだろう。

そして 2)については、態度変容に向けた社会的な取り組みに本研究の知見を活かしていきたい。今回発見した社会的ジレンマの解決には、それに関わる住民の意識を変えることが有効である[25]。昨今、避難警報の発信において、ナッジを用いた避難誘導メッセージを放送する自治体もでてきている[26]。そのナッジに含めるべき内容も、住民の避難意識や地域のソーシャルキャピタルに応じて変えていかなければ有効に機能しないと思われる。地域全体として、どのような避難意識を持つ住民が多く住んでいるのか、地域性を考慮したナッジのあり方を模索したい。

今回、シミュレーションを通じてリスクの解明という方向性で進めた。一方で、リスクを取り除くための具体的な対策を提案するまでには至っていない。これについては二つの課題がある。

1 つ目は、現実的に起こりうるシナリオを完全に抽出できていないことである。シナリオごとに解決策が見出されるとして、現状での人手によるシナリオ作成では、知らずとして特定のリスクを見逃してしまっている可能性がある。シナリオを自動で作成し、網羅的なシミ

ュレーションを行うことは,あるかもしれない災害へ対策には必要な技術といえる.

2 つ目に,モデルの精緻化が挙げられる.シミュレーション技術を用いたコミュニケーションという観点では,可能な限り現実的で納得のいくモデルは欠かせない.他方,特に個別性の高い住民の行動モデルの構築は容易でない.本研究を含む多くの研究で,地域住民へのアンケートからのモデル化が試みられているが,避難意識への社会的望ましきバイアスの存在と,それ故にモデルの正当性の評価が適切にできない状況にある.実際に昨今,携帯の位置情報による人流の位置データが手に入るようになってきていることから,災害時の実際に住民がとった避難行動のリアルデータによる避難行動モデルの検証も目指していきたい.

3 つ目に,態度変容の方向性や避難時の避難行動の決定についてより詳細に検討できる仕組みが必要である.例えば,地域全体と住民個人のとる戦略の違いについて,ゲーム理論の枠組みからアプローチし,状況に応じてとるべき避難行動が異なること示し,具体的な行動モデルを構築することが考えられる.

—参考文献—

- [1]. 高知県宿毛市, “南海トラフ地震宿毛市長期浸水対策”, 2021.
- [2]. 江東5区大規模水害対策協議会, “江東5区大規模水害避難等対応方針”, 平成28年8月.
- [3]. 総務省消防庁, 第2回“大規模自然災害に伴う浸水区域における救助技術の高度化に関する検討会”, 平成29年11月.
- [4]. The International River Interface Cooperative: Public Domain Flow and Morpho dynamics Software for Education and Applications, *Advances in Water Resources*, 93A, pp.62-74, 2016.
- [5]. 国土交通省, PLATEAU, Available online: <https://www.mlit.go.jp/plateau/>
- [6]. 中央防災会議: 「首都直下型地震避難対策等専門調査会」, 2008.
- [7]. 株式会社ドコモインサイトマーケティング, モバイル空間統計
- [8]. 森尾淳, 牧村和彦, 山口高康, 池田大造, 西野仁, 藤岡啓太郎, 今井龍一, “東京都市圏におけるモバイル空間統計とパーソントリップ調査の比較分析—都市交通分野への適用に向けて—”, 第52回土木計画学研究発表会・講演集, pp.882-889, 2015.
- [9]. Rogers, R. W., “A protection motivation theory of fear appeals and attitude change”, *The Journal of Psychology*, Vol. 91, pp. 93-114, 1975.
- [10]. 柿本竜治, 上野靖晃, 吉田護, “防護動機理論に基づく自然災害リスク認知のパラドックス検証”, *土木学会論文集 D3(土木計画学)*, Vol.72, No.5, (土木計画学研究・論文集第33巻), pp.-I_51-I_63, 2016.
- [11]. Mileti, D et al., “Planning and implementing warning systems”, Lystad, M ed., *Mental health and care in mass emergencies: Theory and practice* pp321-345. Brunner/Mazel.
- [12]. MIKAMI, S et al., “Disasters and Human Behavior”, University of Tokyo Press, 1982.
- [13]. 中央防災会議: 「大規模水害対策に関する専門調査会」第12回, 2008.
- [14]. 片田敏孝, 桑沢敬行, 信田智, 小島優, “大都市大規模水害を対象とした避難対策に関するシナリオ分析”, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.69, No.1, pp.71-82, 2013.
- [15]. 荒川区, 東京都, “Arakawa Ward Wind and Flood Damage Response Guidelines”, 2021.
- [16]. 総務省消防庁, 「消防・救助技術の高度化等検討会」, 2012.
- [17]. 池内幸司, 越智繁雄, 安田吾郎, 岡村次郎, 青野正志, “大規模水害時における孤立者数・孤立時間の推計とその軽減方策の効果分析”, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.67, No.3, pp.145-154, 2011.

- [18]. Kucewicz-Czech E, Damps M. Triage during the COVID-19 pandemic. *Anaesthesiol Intensive Ther.* 2020;52(4):312-315. doi: 10.5114/ait.2020.100564. PMID: 33165882
- [19]. Neves NMBC, Bitencourt FBCSN, Bitencourt AGV. Ethical dilemmas in COVID-19 times: how to decide who lives and who dies? *Rev Assoc Med Bras* (1992). 2020 Sep 21;66Suppl 2(Suppl 2):106-111. doi: 10.1590/1806-9282.66.S2.106. PMID: 32965367
- [20]. 竹内光生,近藤光男,山口満,渡田洋平, “容量を考慮した津波避難場所の評価に関する実証分析－須崎市を対象として－”, 土木計画学研究・論文集, Vol.20, No.2, 2003.
- [21]. Jerry, T et al., “Improving shadow evacuation management: Case Study of the Graniteville, South Carolina, chlorine spill”, *Journal of Emergency Management*, Vol.5, No.1, 2007.
- [22]. Dash, N et al, “Evacuation decision making and behavioral responses: Individual and household.” *Nat, Hazards Rev.*, 8, 69-77, doi:10.1061/(ASCE)1527-6988(2007)8:3(69).
- [23]. 藤見俊夫, 柿本竜治, 山田文彦, 松尾和巳, 山本幸, “ソーシャル・キャピタルが防災意識に及ぼす影響の実証分析”, 自然災害科学, *J. JSNDS* 29-4, pp.487-499, 2011.
- [24]. 片田敏孝, 児玉真, 金井昌信, 岩崎隆雄, 手島知史 “災害対応意識デルファイ調査を用いた住民の態度行動変容過程の追跡”, 土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2004.
- [25]. 藤見俊夫, 柿本竜治, 山田文彦, 松尾和巳, 山本幸, “ソーシャル・キャピタルが防災意識に及ぼす影響の実証分析”, 自然災害科学, No.668/IV-53, pp.19-35, 2001.
- [26]. 大竹文雄, 坂田桐子, 松尾佑太, “豪雨災害時の早期避難促進ナッジ”, *RIETI Discussion Paper Series* 20-J-015, 2020.

第5章

排水処理の効果を考慮した 長期浸水域での救助戦略の立案と有効性の評価

---概要---

水害の激甚化を受け、大規模な要救助者の発生に対する救助活動の限界が叫ばれている。そうした事態を解決するため住民への自主的な避難を要請することも検討されているが、住民の避難意識は依然として改善されていない。そうした浸水想定地域内の住民がほとんど避難しない状況に対し、救助計画の見直しが必要になっている。本章ではプラットフォーム上の救助モデル及び排水処理モデルを組み合わせることで、浸水域での排水処理作業の効果を取り入れた新たな救助活動戦略を立案する。具体的には、浸水範囲が変化することを踏まえ、前進拠点の再配置や一時搬送拠点といった新たな救助戦略を導入した。この提案した救助戦略をもとに実大規模の救助シミュレーションを実施し、従来の戦略よりも多くの住民を救助できることを確認した。また、さまざまな戦略シナリオを比較することで、排水処理を考慮した救助戦略の特性を把握した。救助戦略の強みを活かすためには排水処理能力の強化とその稼働の信頼性を高めることや、またそれでも救助しきれない住民を具体的な居住場所や浸水状況から判断しより重点的な対策を導入すること等の今後の洪水対策への知見を提供した。

5.1 はじめに

浸水域内での救助活動の限界が叫ばれるなか、新たな救助計画が求められているといえる。それらの計画の方向性は、大きく二つに分けられる。ひとつは、救助リソースの増大や戦略の刷新をはじめとした救助活動の効率化を目指すものである。この方法自体は災害の大規模化へのシンプルな解決アプローチであるが、ボートの充填や配置コスト、人材の育成コスト等、即座に実現できるものではない。そこでふたつ目の計画として、救助活動ではなく、救助を受ける住民へと視点を移すというアプローチも検討される。洪水が市街地を浸水させるよりも前に、住民を浸水域外へと避難を誘導することにより、その後の救助リソースの適正な配分を促し、迅速な救助活動を実施できると期待できる。

4章では、長期的な視点にもとづく住民の避難行動の是非をプラットフォーム上で判断し、今後の大規模洪水発生に向けた避難行動プランを検討した。そのなかで、仮に住民の避

難行動を変容できれば、浸水域内での救助活動のパフォーマンスを改善できることを示した。昨今、ナッジの理論[1]を導入した避難警報の発信を実際の防災計画に盛り込んでいる地域もでてきている[2]。特に、他者の避難状況という外部性に焦点をあてることで、住民の避難行動のトリガーを引くことに繋がる可能性も示されている[3]。

しかし、ナッジをはじめとした行動変容手法の具体的な効性についてはまだ検証が十分とはいえない。特に、防災分野においては、知識の獲得やリスク認識の向上が必ずしも適切な避難行動につながるとは限らないという心理的な矛盾の存在が問題視されてきた[4]。また、洪水発生時の住民の避難率が芳しくないことも実態として存在している。3章で示したアンケート結果からも判明したことであるが、長期浸水リスクのある地域に住む住民に対し避難意識を調査した。残念ながら、救助されないというリスクを知ったうえでも、浸水想定域外に避難することにまで意識が届いておらず、救助活動のリソースする自体が招いてしまうリスクが依然と高いと判明した。

3章でのアンケート結果を踏まえ、江東デルタ地帯に住まうほとんどの住民が大規模洪水発生時にも避難しないと考えられる。この想定を救助活動側の視点で捉えると、大多数の要救助者の発生に備え、一人でも多くの住民を救助するための救助戦略の立案が求められるだろう。そこで本章では新たな観点として浸水域での排水処理の効果を考慮した救助活動戦略について評価することとした。排水処理そのものは、主に事態の復旧作業の用途で導入される災害対応であるが、ここでは浸水域での救助活動戦略のひとつの要素として考える。排水処理によって浸水範囲が縮小すれば、水上での移動が遅いというボート救助活動のデメリットを補う効果を見込める。また、浸水状態が解除された場所では、住民自身の追加避難が可能となるため救助リソースの圧迫を緩和することが期待できる。そこで従来の救助活動に排水処理による浸水状況の改善効果を取り入れることで、新たな救助戦略やそのパフォーマンスについて評価することを目的とする。

また、このプロセスから得られる知見は大きく以下のふたつである。

1) 住民の避難行動の改善をあえて期待しない状況で、現状のリソースだけでどこまで救助活動のパフォーマンスを向上できるのかを見積もること、

2)一定期間内に救助できない住民が発生した場合、それはどのような理由であるかを分析し、その住民に対しより強い働きができるよう事前計画への知見を収集することである。

従来の救助活動の役割だけで対処するのではなく、別の災害対応の役割をも戦略に取り入れるといった複数の災害対応を踏まえた解決策を検討していくことで、戦略の幅を広げ

ることや同時に対処能力を向上させられると期待できる。もちろん、それでも住民すべてを救助しきれない状況が発生するような洪水・氾濫が今後起きることも想定されよう。そのため、救助戦略の限界にも触れつつ、より優先的に救助すべき住民や前もって避難を誘導すべき住民の存在を可視化し、今後の救助戦略や防災計画での検討事項に加える必要もある。救助活動の効果及び限界を改めて分析し、他の災害対応・ステークホルダーに期待する活動内容を調べることにもつながるだろう。

本研究との類似研究としては、池内ら[5]が排水処理による浸水域内の孤立住民の低減効果を評価している。こちらの研究では、排水処理の効果を考慮しているものの、それを積極的に救助戦略にとりいれてはいない。そのため、排水処理を含めた救助活動のパフォーマンスと限界については十分には検討されていないといえる。そこで、本研究では排水処理による浸水状況への影響をモデル化し、救助活動シミュレーションに加筆する。浸水状況が縮小していくという変化を意識した新たな救助戦略を提案し、その効果をマルチエージェントシステムで評価する。

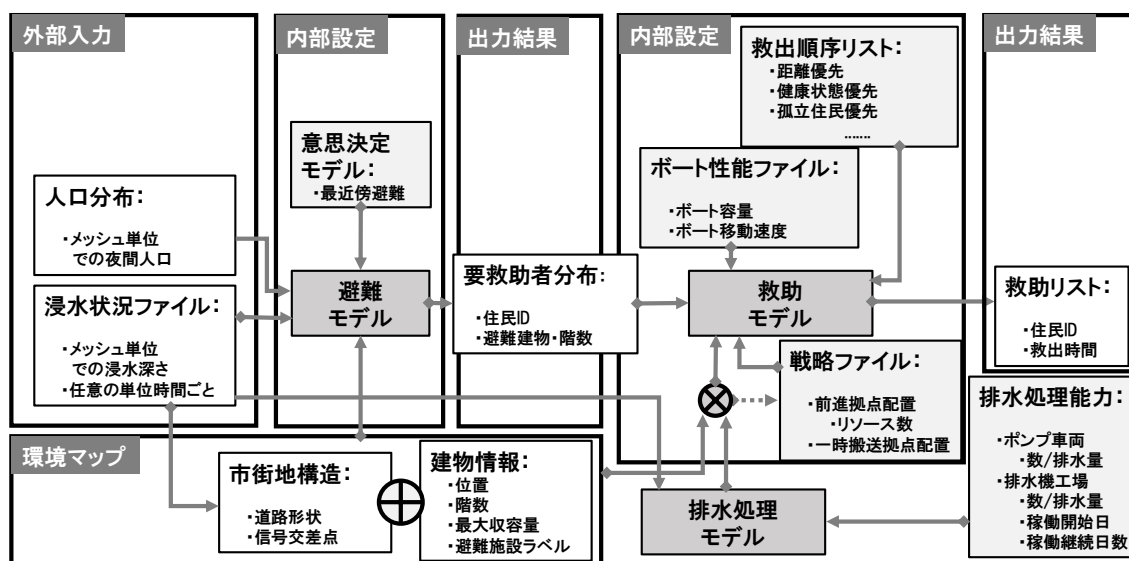


Fig.5-1 プラットフォーム上での操作手順(救助モデル+排水処理モデル)

Fig.5-1 に本章におけるプラットフォーム上での操作手順を示した。基本的なシステム構成は前章の Fig.4-6 に従うが、救助シミュレーション上での浸水状況の入力過程において、排水処理モデルを組み入れている点が特徴的である。第2章で説明したように、この排水処理モデルは計算領域内に投入された排水処理能力に応じて浸水範囲を縮小させ時刻歴の浸水状況ファイルを出力する。その浸水状況の変化に沿って救助活動上の前進拠点の設置やリソース配分を戦略として決定していくこととする。排水処理の効果を検討した新たな救助

戦略については次節に述べる。

5.2 排水処理の効果を考慮した救助活動戦略

排水処理の効果を考慮した新たな救助モデルについて説明する。救助モデルの詳しい説明は2章に任せるとし、ここではその概要及び排水処理の効果を見込んだ新たな挙動について述べる (Fig.5-2)。

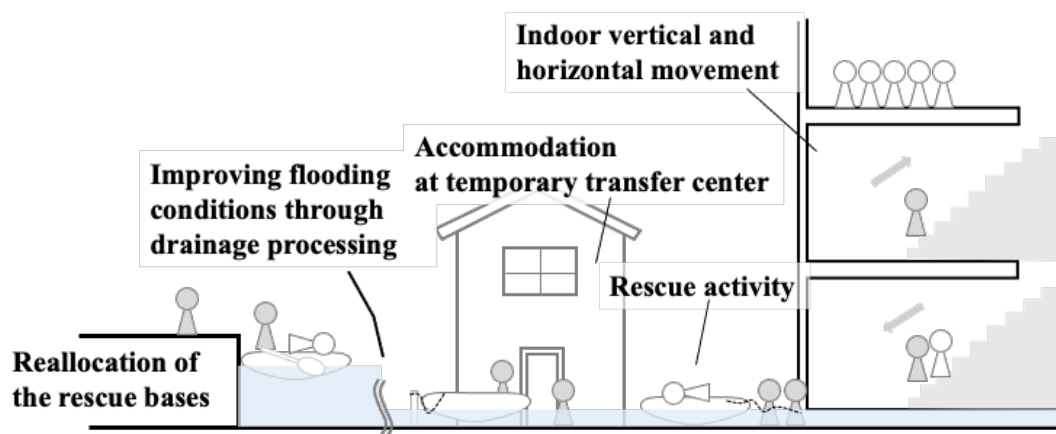


Fig.5-2 排水処理の効果を考慮した新たな救助活動モデルの概要

まず、浸水域での救助活動は、水上での活動であることからボートを用いて行われる。ボートでの移動は遅く、また一度にボートに乗せられる住民の数にも限りがある。これらの厳しい制約により、浸水域での救助活動のパフォーマンスは、地上のそれと比べて大きく不利であり、大多数の要救助者を一定期間内に救助することは困難である。そうしたボート救助活動のもうひとつの特徴は、ボートが移動できる領域、つまりは浸水範囲境界部分に前進拠点と呼ばれる住民の搬送先拠点を設置することである。ボートでの救助活動の目的は、住民の浸水域外への搬出であるため、前進拠点において地上の活動部隊へと住民が受け渡されることになる。ボートの乗船定員の関係から、この前進拠点と要救助者の位置との間を幾度も往復するというのが水上での救助活動時間のほとんどを占める。

このような救助活動の特徴を踏まえ、排水処理による浸水状況の変化に応じた新たな救助戦略の方針を以下に示す (Fig.5-3)。

A) 前進拠点の再配置:

浸水域での救助活動では、浸水領域境界に活動拠点を配置した陣形を構築している。そのため、排水作業により浸水範囲が縮小した場合には、それに対応するように拠点を浸水域の中心部分に近づけていくことができる。拠点の再配置により要救助者と拠点の距離が総じ

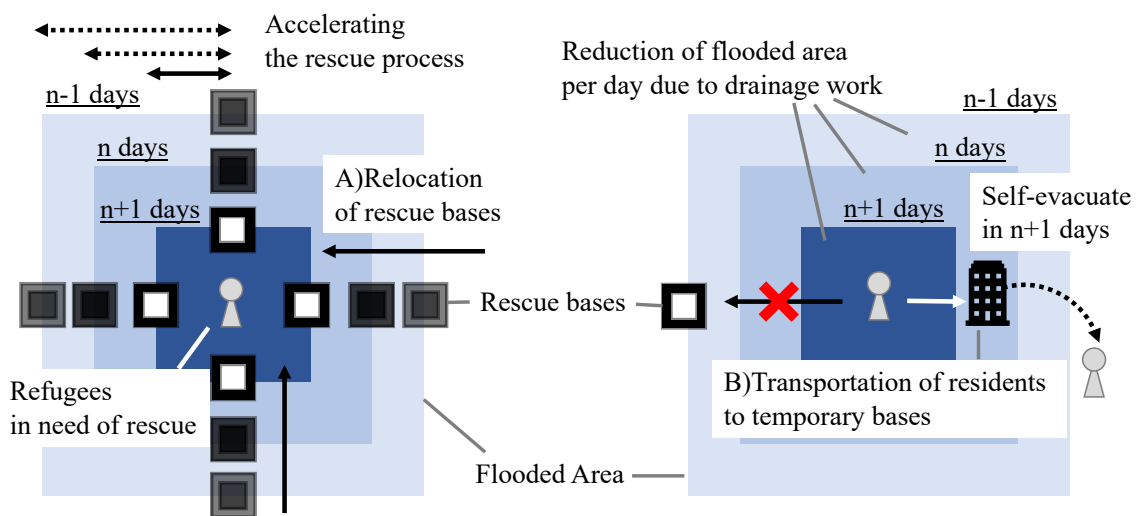


Fig.5-3 新戦略とその役割と効果

て短くなるため、救助活動中の移動時間の削減につながる。結果として、単位時間当たりの救助者数が日数経過とともに改善されると期待できる。

B) 一時搬送拠点の設置：

建物から救出した住民を即座に浸水域外に搬送しなくよいのであれば、将来的に浸水状況が解消される場所にある建物に住民を一時的に滞在させるという手段も検討できる。一定期間以内に浸水状況から解放される建物に住民がいれば、その住民は救助活動を待たずに自力で避難することも可能である。また、陸路での大量・高速な運搬にも期待できるため、活動時間で不利なボート救助の手間を省くことができる。これらの一時拠点は、主に浸水域内に設置されるため、A)と同様に救助活動中の移動時間の削減につながるため、救助活動のパフォーマンスの向上にも期待できる。

浸水状況が一定ではなく、排水処理による減退効果が見込めることにより、上記の戦略を新たに救助モデルに加えることができる。これらの戦略は、(A)前進拠点の再配置と(B)浸水域内での一時拠点の設置によって、救助活動中の移動時間の削減による救助パフォーマンスの改善を期待できる。また救助活動に依らない住民の自力避難も見込めるために、救助対象の削減とともに、救助リソースの配分が適正化することも期待できる。これらの効果は、時間経過によって、つまり浸水範囲の縮小に伴い、加速的かつ相乗的な効果を生み出すと考えられる。

本項最後に、今回構築するシミュレーションの全体的な処理の流れを整理する (Fig.5-4)

1) Drainage Processing Model

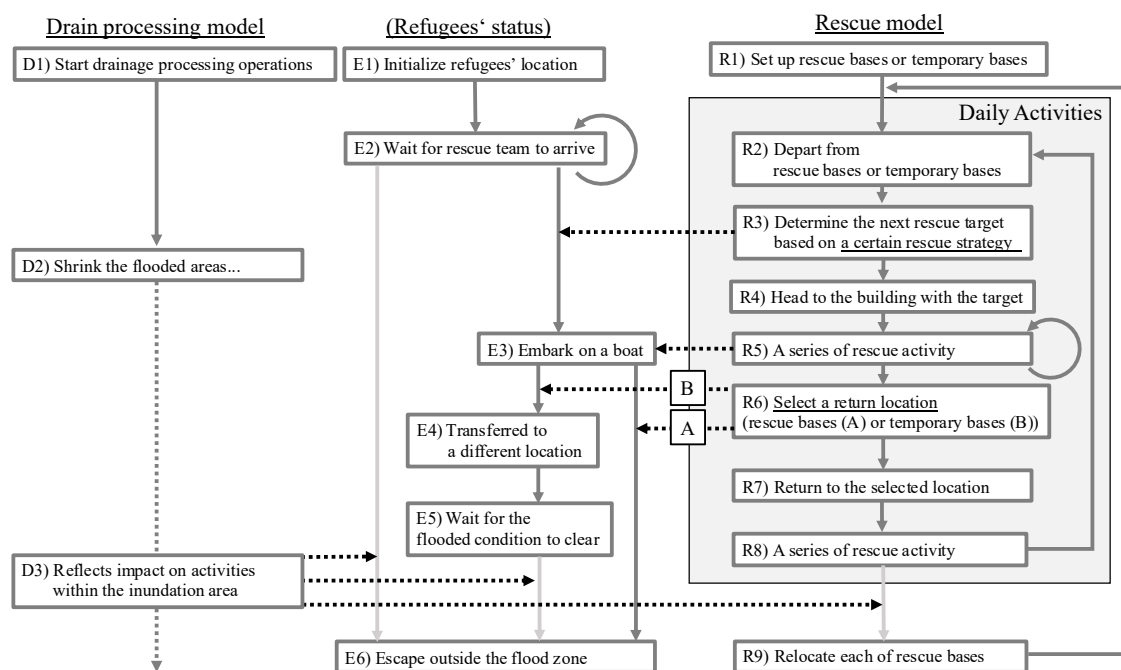


Fig.5-4 救助シミュレーション内の処理フロー

排水処理作業では、現場に導入される排水処理能力を設定後、浸水域内の排水を開始していく (D1)。この排水作業は、救助活動の開始と同時に行う場合や、状況によって作業開始が遅れる場合もある。そうした排水処理のシナリオに基づき、モデルの動作中は、D1 で設定した排水能力に応じ、排水処理モデルの処理プログラムに沿って浸水範囲を徐々に小さくさせていく (D2)。浸水状況の変化は特定の時間ステップごとに評価され、浸水域内の住民の状態や救助部隊の戦略に影響を与える (D3)。今回は浸水状況の変化が 1 日ごとに反映されるとものとした。D3 による具体的な効果は Fig.5-3 に示した通りである。

2) Rescue Model

救助シミュレーションでは、まず浸水域内での活動の中心となる前進拠点や、戦略上有効な一時拠点の場所を設定する (R1)。このとき、前進拠点は浸水域の境界部分に、一時拠点は浸水域内に配置する。特に、一時拠点はある一定日数経過後に浸水状況が解消される地点を選択できるよう計画するため。想定する排水処理シナリオ、つまりは浸水状況の想定水位を事前に確認したうえで一時拠点を決定する。またこのフェーズで、各前進拠点に配置するボートリソース数やボートの性能(移動速度や定員)を設定する。

救助活動時は、この前進拠点あるいは一時拠点から出発し (R2)、救助方針にもとづき次の救助対象を決定する (R3)。対象者のいる建物へと道路に沿って移動し (R4)、現場に到着後一連の救出活動を行う (R5)。要救助者をボートに乗せたあと、まだボートの乗船数に余

裕があれば、再び新たな住民を救出し、ボートに乗船させる。ボートの乗船数が定員に達した、あるいは目の前の建物に要救助者がいなくなれば、住民の搬送作業に移る。搬送先として前進拠点か一時拠点を選択し(R6)、選択し他場所へと移動を開始する(R7)。目的地に到着後、乗船者を下ろす一連の作業を終え(R8)、再び活動開始となる(R2)。これら R2-R8 の活動を1日の活動期間内に何度も行い、浸水域内の要救助者が完全になくなった時点で計算を終了する。

なお、排水処理作業による浸水状況の変化(D3)を受け、1日単位で前進拠点の再配置を可能とする。救助部隊が1日の活動を終えたあと、必要であれば前進拠点の再配置を行い、再び翌日の活動を R2 の状態から開始する。

3) Refugees Status

最後に、これらの救助シミュレーション内での各住民の状態を説明する。シミュレーション開始後、浸水域内で住民の配置が初期化され(E1)。救助部隊の到着を待機する(E2)。救助部隊によって救出されると(R5)、その住民はボートに乗船する(E3)。そして、救助部隊の判断(R6)によって、前進拠点か一時拠点へと搬送される。前進拠点へと帰還した住民はそのまま浸水域外へと脱出し、救助完了となる(E6)。なお、排水処理作業による浸水状況の変化(D3)を受け、救助待機中の住民(E2)および一時拠点内の住民(E5)は、その場の浸水状況が解消されると同時に自力で浸水域外へと脱出し、救助完了の判定がそのタイミングでなされる。

こうした計算フローを俯瞰すれば、今回排水処理の効果に合わせた救助戦略として、大きく3つの要素(R1,R3,R6)を調査することができる。例えば、R1の拠点の配置計画では、浸水状況の変化に合わせてより最適な配置やリソース配分を検討できるだろう。しかし、これらの計画について厳密に調査や最適処理を導入することは今回避けている。その理由として、これらの戦略が救助パフォーマンスを向上させるうえで有効であると同時に、しかし抜本的な改善にはつながらないと判断したためである。その点については、次章で示す実大規模救助シミュレーションの結果からも伺えるはずである。

そこで、残りのふたつの要素である、住民の救助手順(R3)や搬送先の選択方法(R6)について調査していく。ここには、新たに導入した戦略である前進拠点の再配置や一時拠点の計画と、救助の手順という従来の救助戦略とを組み合わせることで、複合的により優れた戦略を生み出せるとの仮定が置いている。そこで、排水処理を行わない救助活動と比べ、どの程度多くの住民を救助できるようになったのかを定量的に評価し、各戦略の特性をも把握することとする。具体的なシミュレーションのシナリオは次項で導入する。

さてこのどちらの方針も排水処理能力に依存したアプローチであり、浸水範囲がある程度縮小していない状況では実行できない。そのため、排水速度が劣っている場合には、これらの戦略の恩恵が全く得られない可能性もある。排水処理を考慮した救助方針を計画するためには、あらかじめ排水機能による浸水状況の推移を適切に把握する必要がある。以降の章では、具体的な市街地、災害シナリオ、そして排水シナリオに基づき、救助活動の戦略について整理する。

5.3 救助活動戦略の設定

5.3.1 実大規模の要救助者発生シナリオ

救助活動の対象となる江東デルタ地帯内の住民の避難状況を設定する。第3章のアンケート結果から、江東デルタ地帯内の住民のほとんどが域外に避難しないと想定する。そこで今回は江東デルタ地帯内の総人口規模の救助活動を実施するものとする。住民の配置状況については携帯電話の位置情報に基づく夜間人口分布[6]から算出し、この住民の分布から、簡易的な避難シミュレーションを行い、救助活動実施前の避難状況を構成する。

具体的には、1)まず夜間人口分布データと同地域の3D建物データ[7]から各建物の各階に住民を配置した。次に、2)浸水の恐れがある2階レベル以下の高さにいる住民、および3階以上にいる住民のうち一定の割合だけを避難行動の必要のある住民と想定する。そして、3)避

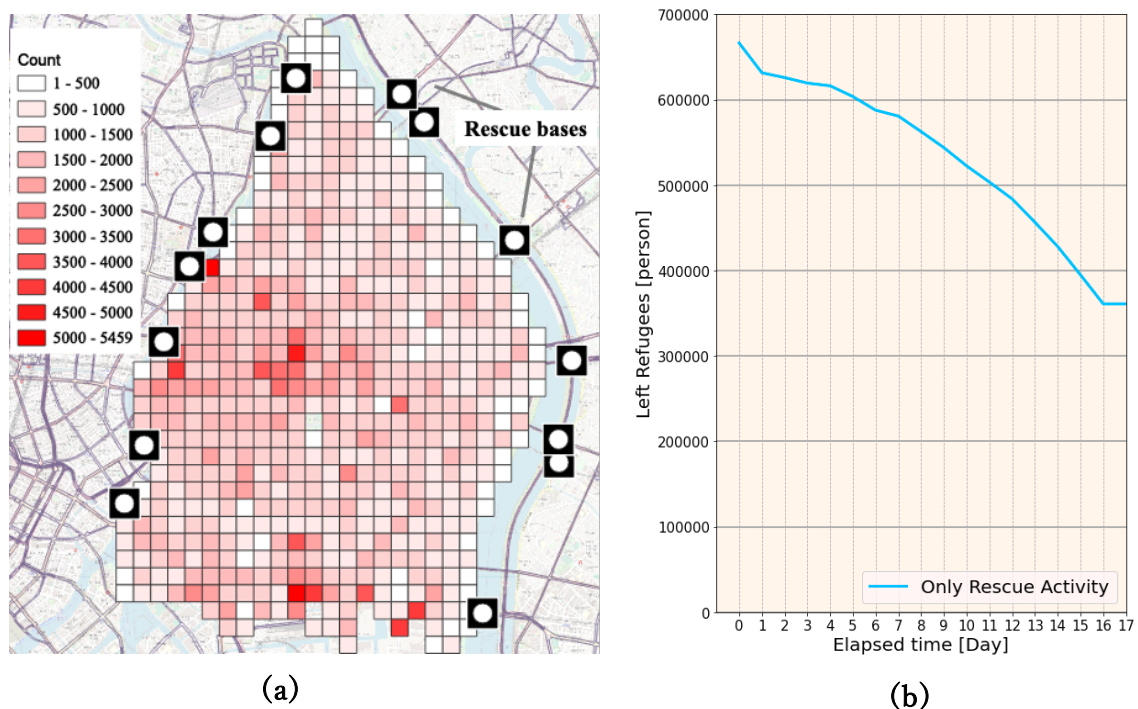


Fig.5-5. 実大規模の避難状況の様子と排水処理を考慮しない救助活動の効果

難先としては、住民の現在地から最近傍にある避難施設を選択するものとする。この簡易的な避難シミュレーションのなかで、浸水域外へ脱出する住民は存在せず、全ての住民が救助活動の対象となっている。

Fig.5-5(a)に、今回の救助シミュレーションで使用する住民の避難分布を示す。また、救助シミュレーションの初期の前進拠点位置も提示している。前進拠点は浸水域全体を取り囲むように展開し、各拠点にはボートをはじめとした救助リソースを配置することとなる。当該領域に投入されるボートリソースとしては、文献[5]で調査されている当該領域の管轄組織の保有するボート数を参考に、13 拠点に各 150 個とした。この文献では、今回の研究対象領域と同じエリアを扱っており、浸水対策時のリソースや活動プロセス、活動ごとの必要作業時間を、業務に関わる当事者へのヒアリングを通してまとめている。リソースの配置計画は住民の避難状況に合わせて検討すべきであるが、簡単に記述するために拠点ごとに平等に配置させている。また、1 日の作業時間については、1 日 12 時間での作業時間とし、主に夜間の救助活動はしないものと想定している。その他、救助活動中のボートの移動経路となる道路データは、日本の国土地理院[8]が公開している道路縁データから作成した。また排水処理モデルや浸水モデルの計算に必要な土地の利用状況データや標高 (DEM) データも同様に取得している。

これらの条件のもとに、排水処理の効果を考慮していない場合の救助活動のパフォーマンスを Fig.5-5(b)に示す。このグラフは救助活動開始後の浸水域内の要救助者の残存数の時間推移を示している。図からわかるように、大規模な浸水かつ大多数の要救助者が見込まれるこの地域では、現存の救助リソースだけでは十分には対処できないことがわかる。活動開始後、一週間経過しても 10 万人しか救助が完了しておらず、二週間が経過しても、まだ半分以上の要救助者が残っている。こうした状況では、救助リソースの追加投入だけでは対処できないことも示唆されている。そこで、排水処理の効果を考慮した救助シナリオを設定してみる。

5.3.2 排水処理シナリオ

浸水範囲を狭めることができれば、前章で述べた A) 前進拠点の再配置や B) 一時搬送拠点の設置、といった救助方針を構築することができる。しかし、これらの計画には浸水状況がどのように変化するかを知らなければいけない。また、排水処理作業の実施による浸水範囲の縮小効果は、現場に投入される排水車両や稼働できる排水機の数や能力によって変化する。これらのことから、救助方針を検討する際には、排水処理能力の想定から浸水変化を

前もって予測する必要があるだろう。そこで、いくつかの排水処理シナリオに基づき、今回の救助シミュレーションで見込む浸水状況の変化を設定する。

今回想定する排水処理は、排水ポンプ車と排水機としている。排水ポンプ車の数や性能は、当該地域を管轄する組織の最大保有車両数及び同じ管轄地域内で実際に投入された事例を参考にした。排水機については、江東デルタ地帯内に設置されている排水機工場を対象とし、その排水能力については工場の管轄組織が公開しているデータを参考にした。

排水機工場については、その稼働開始タイミングと稼働継続期間に注意が必要である。工場や施設自体は江東デルタ地帯内に建築されているため、排水作業時にはこの建物自体が浸水している可能性がある。また、ガスや電気などのインフラが停止している場合、排水機そのものを稼働させる続けることも困難になる。こうしたことから、浸水状況や施設の防災設備の如何によっては、排水機を継続して稼働することができず、本来の排水能力を

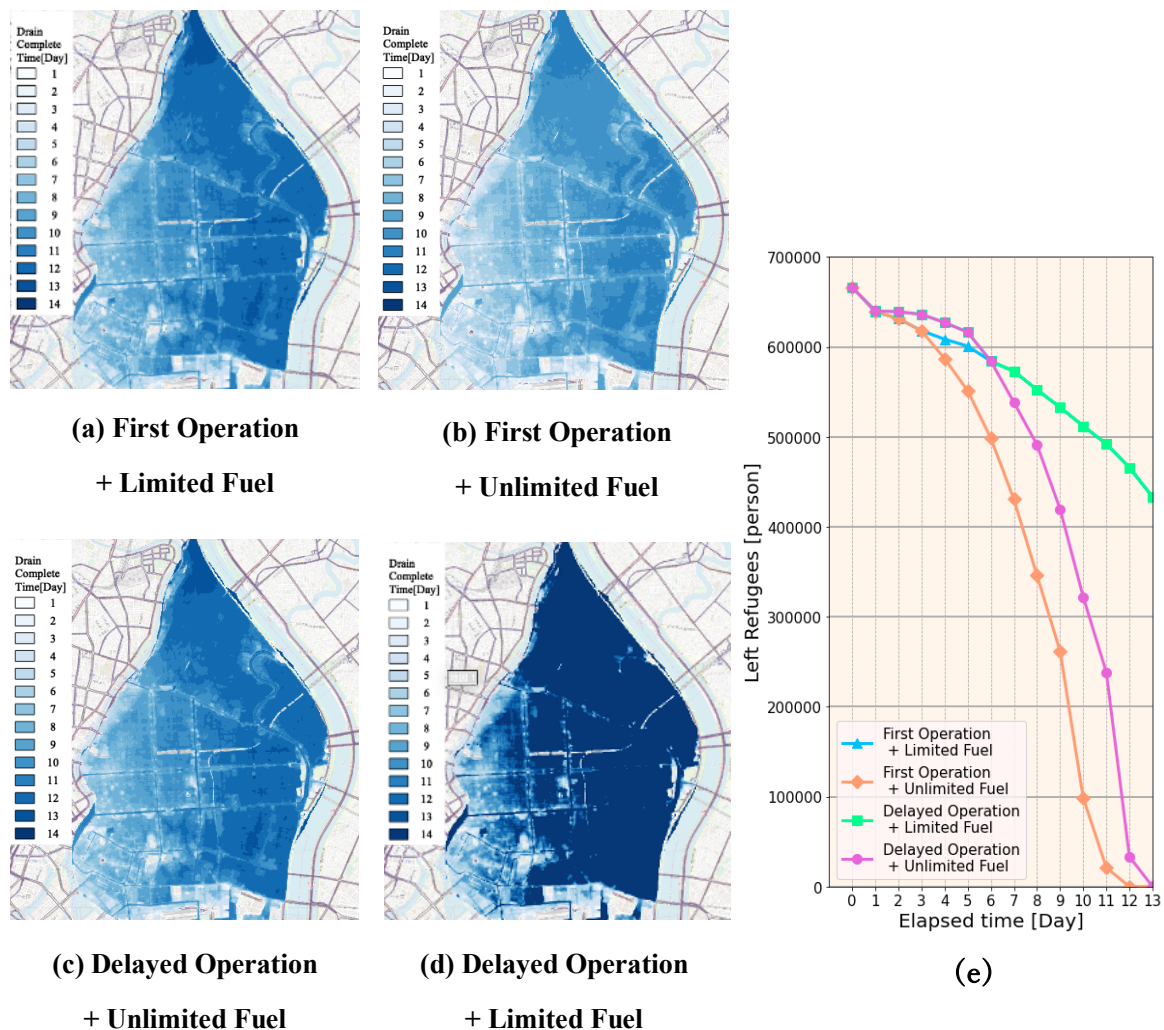


Fig.5-6 各排水処理シナリオに基づく浸水状況の変化の比較と住民への影響評価

期待できないリスクもある。

こうした排水機工場の状態に応じて、浸水状況への影響がどの程度変化するかを把握する必要があるだろう。そこで、排水機の稼働開始タイミングと稼働継続期間の組み合わせによる排水シナリオを作成し、当該地域での排水処理シミュレーションを実行した(Fig.5-6)。各工場の排水機が浸水状態でなくなるタイミングを救助活動開始後 3 日後とし、それに影響を受けることなく初日から稼働できる場合(Fig.5-6(a,b))、および影響を受けて稼働時期が遅れる場合(Fig.5-6(c,d))に分ける。また、工場に十分な燃料があるかどうかで、継続して稼働できる場合(Fig.5-6(a,c))と燃料不足により 3 日間で排水機が停止する場合(Fig.5-6(b,d))にわけた。

それらの排水処理シナリオごとに、地点ごとの浸水状況の解消時期をまとめた分布図を Fig.5-6(a-d)に示した。同時に、この浸水状況の改善効果による浸水域内の残存要救助者数の推移を Fig.5-6(e)にまとめている。Fig.5-6(e)のグラフは、救助活動の効果は考慮しておらず、排水処理作業の影響をうける地域の住民数を表しているものである。これらの図表をみると、排水機の継続的な稼働が重要であることがわかる。なかでも、排水機がほとんど稼働していない Fig.5-6(d)の状況からわかるように、排水ポンプ車両の能力だけでは江東デルタ地帯内の浸水をほとんど改善できていないこともわかる。しかし、初日から排水機を稼働させた場合でも、浸水状況を完全に解消するには 10 日以上要することになった。また、1 週間という期間が過ぎても、半数以上の住民がまだ浸水域内に残されるような浸水状況であることもわかった。この最善の排水シナリオに基づく浸水状況の変化に対し、救助戦略を練っていくことにする。

5.3.3 救助戦略シナリオ

排水処理の効果を見込んだ救助戦略のうち、まず前進拠点の再配置戦略について説明する。前進拠点は浸水領域の境界に設置され、浸水域内にいる住民を域外に搬送するための通過点となる場所である。そのため、排水作業により浸水範囲が縮小すれば、それに応じて前進拠点を移動させ、より浸水域の中心に近い場所に再配置することも検討できる。

そこで、前節の排水シナリオに基づく前進拠点の配置計画を Fig.5-5 に示す。図表に示すように、浸水範囲の縮小に応じて、可能な限り浸水領域境界部分に前進拠点を再配置している。再配置のタイミングは、浸水状況の改善が比較的進んだことを条件に日単位で設定する。また、配置場所については、拠点から陸路での搬送経路が確保できる場所とした。救助活動を開始してから日が経つにつれ、前進拠点が浸水域中心により近づくため、日々の救助活動パフォーマンスが向上していくことが期待できる。救助シミュレーションでは、この前進

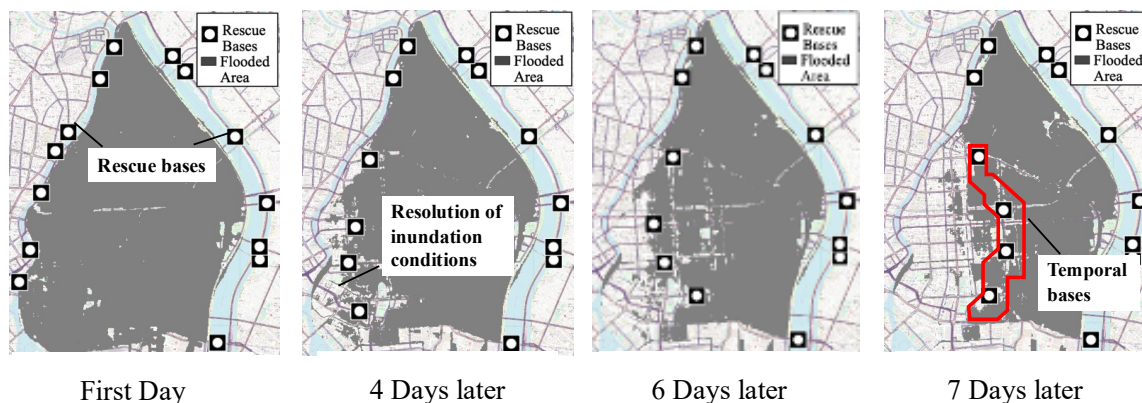


Fig.5-7 浸水状況に沿った前進拠点と一時拠点の設置計画

拠点の配置場所を一日の活動終了時に判定し、所定の日時を経過した場合には、Fig.5-7 で示した位置に前進拠点を再配備している。これらの拠点の配置ルールについては、浸水状況の推移を手作業で確認した上で、その拠点の配置場所を恣意的に設定している。その際には、拠点と要救助者間の移動距離が小さくなるように、また救助後の住民が浸水範囲外へ自主避難ができる経路が確保されていることを条件に検討している。もちろん浸水状況に応じて自動的に活動拠点の配置を決定する仕組みを導入することで、救助活動の効果を最大化することもできるだろう。しかし、Fig.5-5 で見たように、こうした救助活動の改善だけでは事態の深刻さが大きく改善されるとは想定されないため、本研究ではそうした処理を考慮しない方針とした。

次に、もう一つの戦略として、浸水域内に設置する一時搬送拠点の配置計画も検討する。この一時拠点は、将来的に浸水状況が改善されることを見込んで、前進拠点以外の搬送先として用意するものである。そのため、何日以内に拠点内の住民が避難できるようにするのが事前に想定しなければいけない。本シミュレーションでは、救助活動を開始後7日以内に全住民が救助できるよう目指すものとする。この7日という日数は、救助計画における一つの目安であることや、住民の食料備蓄の日数分であるため、この期間を採用した。そのため、7日以内に浸水状態が解かれ、かつ浸水域中心部に近い場所に一時拠点を設置すると計画をたてた。その結果、Fig.5-7 に示す7日目の前進拠点の一部と同じ位置に一時拠点を計画した。この拠点は、活動初日から利用できるものとし、住民の収容数については制限を設けないこととした。この戦略は全住民の早期の域外搬送ではなく、一定期間内での住民の救助数の向上を目指すものである。そのため、活動初期のパフォーマンスは期待できないが、長期的な視点では救助者数を最大化できるように工夫したものである。

これらの排水作業を考慮した新たな救助戦略をシミュレーションに反映し、現状不足している救助リソースの課題をどこまで緩和できるのか、あるいはさらなる限界はどこにあるのかを次章で確認する。

5.4 救助シミュレーションの実施

この節では、ここまでで説明した救助戦略や浸水状況、対象市街地での要救助者の分布を踏まえ、救助シミュレーションを実施する。本研究で提案する排水処理を考慮した救助活動のパフォーマンスがどのようなものであるかを確認していくこととする。各救助戦略の有効性について議論するため、救助シミュレーションで使用する戦略シナリオは段階的にその要素を増やしていく。具体的には、まず前進拠点の再配置だけを考慮した救助戦略に基づき救助者数の推移を確認する。次に、一時拠点の活用を考慮した場合の救助パフォーマンスを確認する。最後に、これまでの戦略の特徴を把握したうえで、浸水状況を考慮した住民の優先的救助を実施した場合の救助活動の有効性を評価する。

5.4.1 浸水状況に応じた前進拠点の再配置戦略

はじめに前進拠点の再配置だけを考慮した救助戦略の効力について確認していく。前進拠点の位置については、Fig.5-7 に示した配置計画に基づきシミュレーションに入力する。浸水状況の変化は一日ごとに反映されるものとし、浸水状態が解かれた場所にいる住民については救助を待たずに自主避難するものとする。それに伴い、各日の救助活動では縮小後の浸水領域内に依然と残っている住民だけに限定して救助を行う。

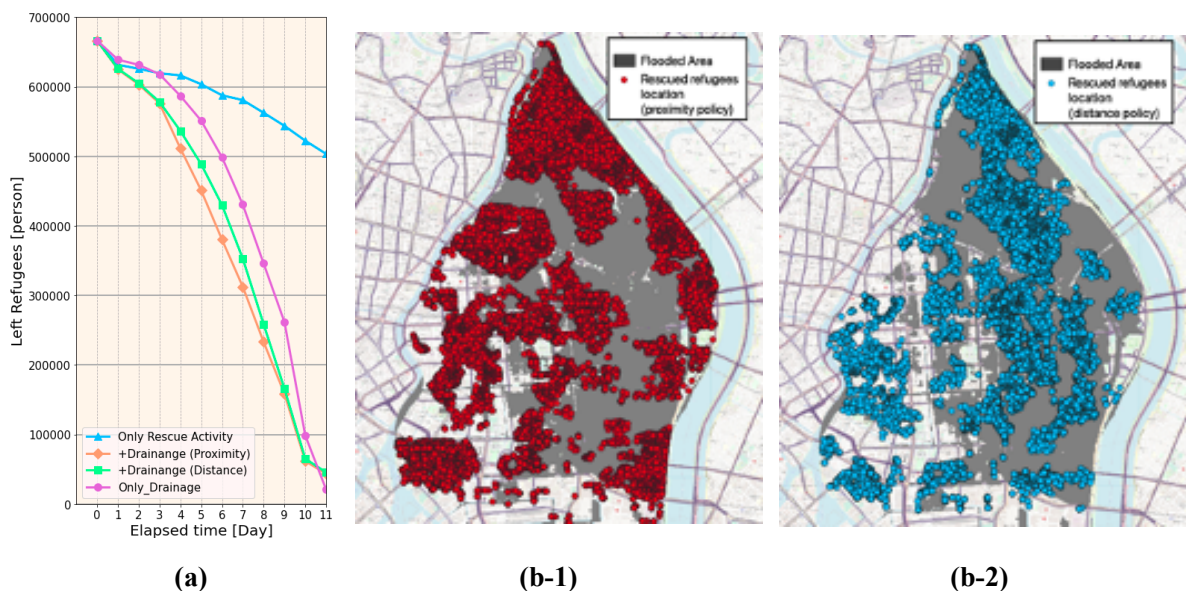


Fig.5-8 前進拠点の再配置戦略のパフォーマンス比較と各戦略で救助された住民の位置

さて、この戦略の性質をより細かく分析できるよう、救助対象となる住民に順番をもうけた救助方針を二つ導入する。具体的には、1)前進拠点からの近い住民を救助するか、あるいは2)拠点から遠い住民をあえて先に救助するか、といったものである。排水処理の効果を考慮した救助戦略では、救助部隊が住民を救出する以外にも、住民自身が地域外へ脱出するという効果も見込める。そのため、あえて救助が遅れても問題ない住民や、逆に優先的に救助に当たらないといけないう住民が存在すると考えても良い。上記の救助方針(1,2)は、特に住民の滞在場所と前進拠点との位置関係に対し、優先度を導入したものである。救助活動そのものの効果と、排水処理による住民の自主避難の促進効果の関係性を把握するための比較シナリオとしている。

Fig.5-8(a)に各シナリオでの救助パフォーマンスの比較を行っている。住民の避難場所に対する救助優先度の導入シナリオに加え、排水処理だけの効果(Fig.5-6(e))と排水処理を考慮しない救助活動だけのパフォーマンス(Fig.5-5(b))も比較対象にした。図からわかるように、排水処理を踏まえた救助戦略は個々の戦略・作業よりも高いパフォーマンスを示していることがわかる。これは、排水処理による浸水範囲の縮小に伴い住民が自主避難できるようになっただけでなく、前進拠点を移動させることで、浸水域内での移動コストを減少させることができ、救助活動の効率が向上していったためであると考えられる。排水処理の効果に対し、前進拠点を移動させるという柔軟な救助戦略の効果がうまく適合したためであろう。

一方、要救助者と前進拠点の位置関係に基づく優先的救助シナリオでは、近さを優先した戦略が総合的によいパフォーマンスを示した。浸水域内での救助活動では、特に移動コストの高さが救助パフォーマンスを大きく下げる要因となっている。そのため、拠点から近い場所にいる住民から救助をすることで、単位時間あたりの救助者数を増やすことができていることが、この方針が優位にたっている理由であろう。

しかし、もう一つの方針である、拠点から遠い住民から救助するという計画も、時間が経つにつれ前者を凌駕するほどの活動の効率化がされていた。救助活動の後期において、このような効率的な挙動を示した理由には、浸水状況の推移と救助された住民との関係性にあると考えられる。Fig.5-8(b)では、ふたつの救助方針で7日以内に救助された住民の位置をプロットしている。これらを見比べると、拠点から遠い場所の住民を救助する方針では、浸水状況が解消されるまで期間が長い地域にいる住民を救助していることがわかる。たしかに移動時間を多くかけてしまう活動方針ではあるが、浸水状況の改善効果との相性のよい活動になっていたことが、長期的には遜色のない良い戦略となった所以である。このことから、浸水状況がどのように変化するかを見定め、住民の救助の順番にも配慮することで、より効率のよい救助戦略が立案できるかもしれない。

5.4.2 一時搬送拠点の設置と活用

次に一時搬送場所の設置及び利用した戦略の効果を見ていく。この一時拠点は浸水域内に設置されるものであり、住民を建物から救出した後の搬送先の候補となる場所である。仮にこの一時拠点へ住民を搬送した場合、住民はその拠点周辺の浸水状況が解除された際に避難し、完全に救出されたものと判断される。この戦略では、住民を早期に浸水域外に脱出させることをあきらめ、代わりに一定期間内に救助される住民の数を最大化させようというものである。このような仕組みであるため、救助活動初期のパフォーマンスは低いが、一時拠点の浸水状態が解放されたタイミングで多数の住民が救出されることになる。つまりは、長期的な目線での救助パフォーマンスを向上させる効果が期待できる。

この戦略では、救助部隊が建物から救出した住民を搬送する目的地が大きく二ヶ所あることになる。従来通りに前進拠点に住民を搬送する場合、即座にその住民の安全を確保することができる。他方、一時拠点へ搬送すれば、即座に救助数に含めることはできないが、一定期間内に浸水域から住民を解放することができる。長期的な視点で救助パフォーマンスを評価した場合、どちらに住民を搬送した方がよいかは判断がつかない。そのため、ここでもいくつかの搬送先の選択シナリオを用意し、より有効な救助戦略への知見を収集することとする。

まず、一定期間で住民を浸水域外へ救出できればよいという方向性であることを述べて

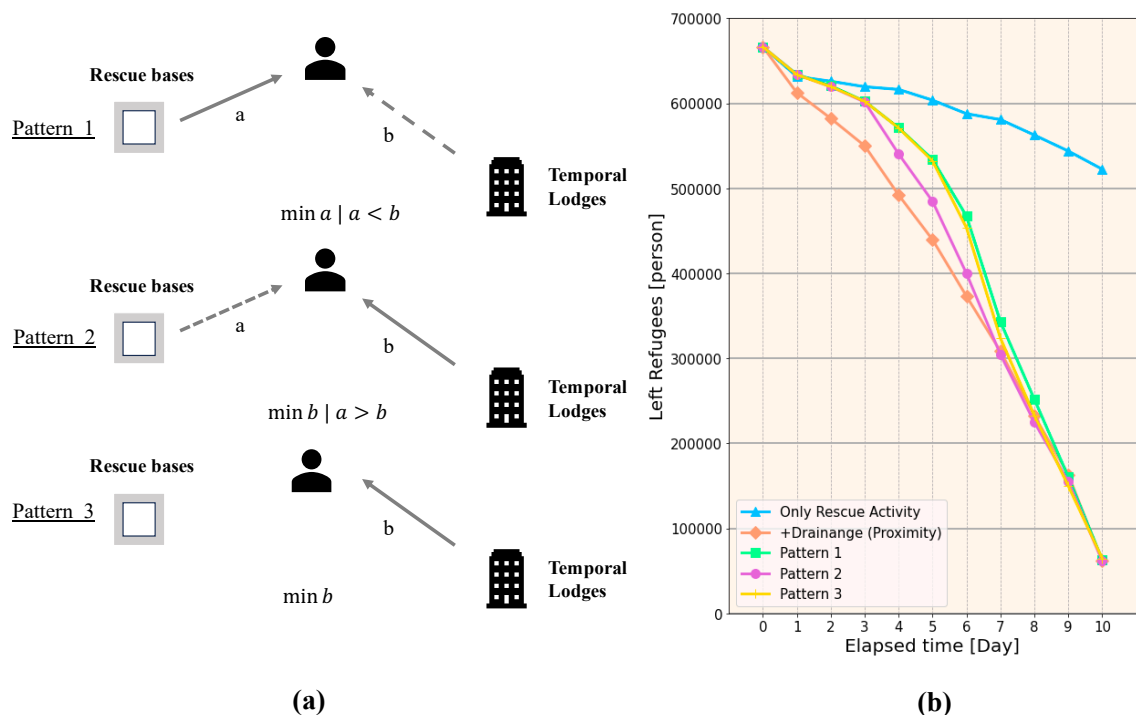


Fig.5-9 一時拠点からの救助対象者の選択方法と各方針の有効性の比較

おく。そのため、ある場所で住民を救助した際には、前進拠点と一時拠点のふたつのうち、近いほうへ住民を搬送することとする。これはより近い場所へ搬送することで、移動時間を短縮しようと狙っているためである。問題は、一時拠点や前進拠点から救助活動を再開した場合に、次に救助すべき住民の選択にはいくつかのパターンがあり、どれが優位な手段であるかは判然としない。そこで、Fig.5-9(a)に示すような3つのパターンを検討した。

パターン1では、前進拠点からの距離を優先する方針であり、各住民の完全な救出を目指すものである。パターン2では、逆に一時拠点からの距離を優先する方針であり、前進拠点へ搬送するよりも一時拠点への搬送のほうが時間的に有利になるように、救助箇所を選択するものである。そして、パターン3は、とにかく一時拠点に近い場所へと救助に向かうものであり、その際には、前進拠点との位置関係は一切考慮にいけない方針となっている。これらの救助先の選択シナリオに対し、各パフォーマンスを比較した(Fig.5-9(b))。

この図表をみると、どのパターンも6,7日目に多数の救助者数が記録されていることがわかる。一方、活動開始後の7日間では、通常の救助戦略と比べてパフォーマンスが劣っている。これらのことは、一定期間内の救助活動で一時拠点へ住民が搬送されており、浸水状態が解消されたタイミングで、それまで集約されていた住民が一度に救出されたためである。このように、一時拠点の設置及び利用した戦略では、目標期間内の最終日に救助パフォーマンスを最大化する戦略であることがわかる。しかし、今回のシナリオでは、一時拠点の有効性が確認できていない。その理由を分析する。

まず、3つのパターンのうち、パターン1はパターン2,3よりも7日目までの成果が相対的に悪い。これは、一時拠点よりも前進拠点への搬送を優先したことや、結果として住民の搬送に多くの時間を要したことが原因であると考えられる。パターン2とパターン3では、7日目には通常の救助戦略に匹敵するパフォーマンスとなっているが、パターン2のほうが一貫して多くの住民を救助できていた。これは、パターン3と異なり、パターン2では一時拠点へ集約する搬送時間の方が常に有利となるよう、救助する住民をより厳しく選択していたことが功を奏したといえる。7日以内に浸水状態が解除されると分かっている前進拠点に近い住民よりも、浸水状態が継続する見込みの高い一時拠点付近の住民を救助することで、その後の浸水状態の改善効果との相性のよい方針になったためであろう。

5.4.3 住民の地理的位置に基づく優先的救助戦略

このような救助パフォーマンスの優劣差からわかるように、一時拠点に搬送することが理に適っている住民だけに焦点をあてて救助することが、もっとも一時拠点を利用した戦略の効果を引き出せると考えられる。そこで、最後の戦略シナリオとして、一時拠点の有効性を最大限引き出すための救助方針を検討する。

そもそも一時拠点の役割は、一定の期間内住民を収容し、浸水状態の解消とともに住民を自主的に避難させることで、救助活動の搬送時間を削減させるものである。そのため、本来救助すべきなのは、その一定期間内に浸水状態が解消されない地域にいる住民であるはずだろう。また、住民の搬送時間の短縮のためには、わざわざ前進拠点に帰還せず、一時拠点付近だけで活動するのが有利とも考えられる。こうしたことから、救助する住民に優先度をつけた戦略シナリオを、浸水状況を踏まえた観点から検討する。具体的には、活動開始後 7 日以内の住民の救助を目標とした場合、8 日以上浸水している地域の住民だけを先に一時拠点に搬送するという方針が考えられる(Fig.5-10(a)).また、移動コストに配慮し、この領域の住民は、前進拠点には一切搬送しないということもできる。

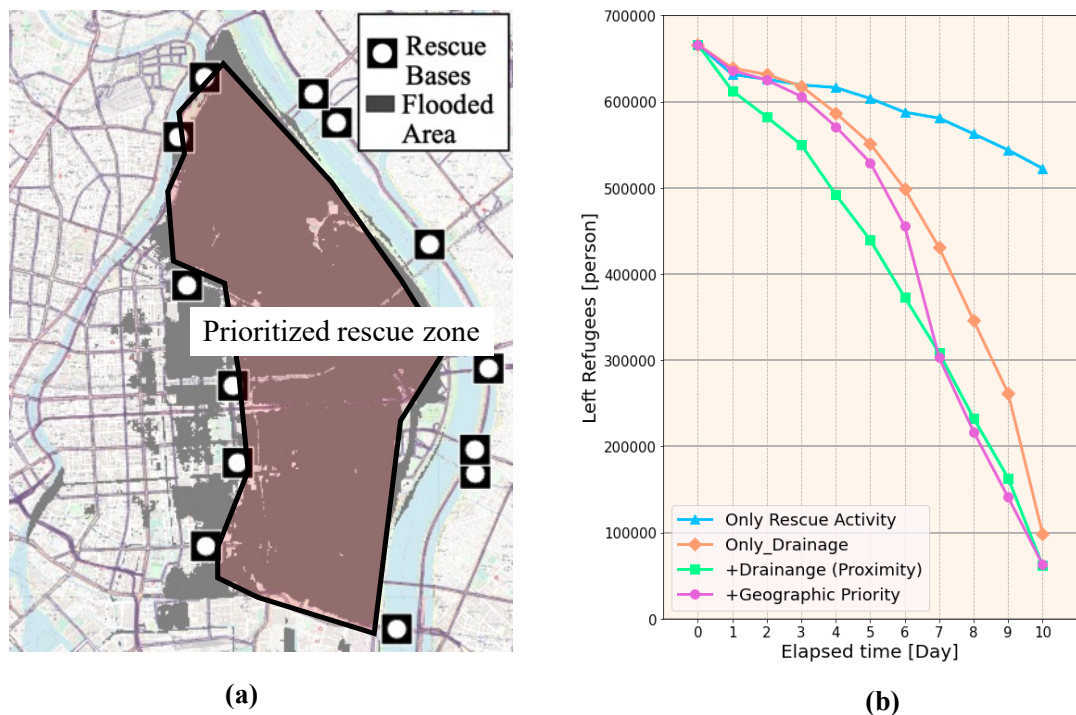


Fig.5-10 住民の位置情報に基づく優先救助の条件設定と救助パフォーマンスの評価

これらの方針を含め、再び一時拠点を活用した救助戦略でのシミュレーションを実施した(Fig.5-10(b)).結果として、一定期間内で最も多くの住民を救助できていた距離優先の戦略シナリオを、7日目の活動で上回るパフォーマンスを示した。活動開始後7日間は、一時拠点への住民の搬送作業により、救助活動そのもので救助された住民は存在しない。しかし、浸水状況が長引くと考えられる地域に居る住民から優先的に搬送していることで、その後の浸水状況の改善により自主的な避難ができるようになる住民へと救助リソースを配分せずに済んでいる。浸水状況の推移を考慮し、住民の救助にその地理的な側面から優先度を付与したこと

で、一時拠点の有効性を最大限活かせる方針となったと考えられる。

最後に、この一時拠点を配置する戦略の最適性を探索する。元の排水処理シナリオでは、江東デルタ地帯内の浸水状態が活動開始後 12 日目には完全に解消されている。また、前の戦略シナリオでは、住民の救助期間の目標を 7 日間とし、救助を始めてから 7 日目に住民が自主避難できるように一時拠点の設置場所を設定した。Fig.5-10 でその効果がみられてように、7 日目に大多数の住民が解放され、一時拠点をを用いない救助戦略よりも多くの住民を救助できている。しかし、それ以後のパフォーマンスに差がないことから、一時拠点の効力はこの期日で失われていることになる。

この一時拠点の活用方法では、浸水状態が最後まで解除されない深刻な浸水状況に囲まれた住民の救助を優先し、その住民を一人でも多く救助できるような位置に一時拠点を配置することが最善であると考えられる。つまりは、排水処理の効果だけで対処できる住民以外、つまりはその処理能力だけでは目標期間内に救助できない住民に対し一時拠点をを用いた戦略の効果で補うという関係性にある。この戦略のパフォーマンスを最大限高めるには、このふたつの効力のバランスをうまく適合できる場所に、一時拠点を置くことである。そこで、最終的に全ての住民を救助するまでに要する期間を短縮するには、一体どこに一時拠点を配置するのか、つまりは何日目に浸水状態が解除される場所に一時拠点を置くことが最善であるかを確認しておく必要があるだろう。

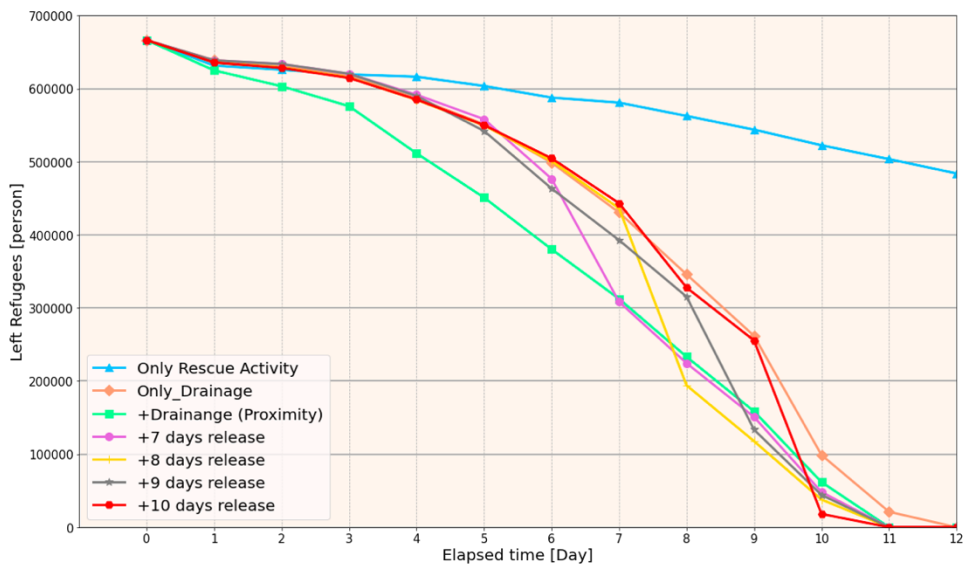


Fig.5-11 一時拠点の配置シナリオごとの救助パフォーマンスの比較

この疑問に対する答えを用意するため、当初の 7 日間での救助目標に加え、8 日から 10 日目に浸水状態が解除される場所に設置した一時拠点を活用した救助戦略のパフォーマンス

を評価した(Fig.5-11).図表からわかるように,各戦略ともに浸水状態が解除される日時に,多くの住民が救出される結果となっている.そして,一時拠点をを用いない戦略よりも,長期的にはより多くの住民を救助できることになった.最終的な全住民の救出達成時刻には大きな違いがなく,最も早く終えたのは10日目に浸水状態が解除される場所に置かれた一時拠点を活用した戦略であった.一時拠点をを用いない戦略よりも約2時間の救助完遂時刻の差があった.これを踏まえると,ボートでの救助活動よりも排水処理の影響のほうがとても大きい.ため,救助戦略ごとの優劣があまり出てこなかったものと考えられる.しかし,浸水域内の全住民の救助を早く達成するならば,より長期的な視点から救助パフォーマンスを評価し,一時拠点を積極的に活用するという方針も検討できるだろう.

5.5 議論

ここまで排水処理の効果をモデリングし,浸水状況の変化に応じた救助戦略の有効性を検討した.この戦略には,排水処理によって浸水範囲が縮小することを想定し,1)前進拠点の再配置や,2)一時拠点の設置,という新たな方針を加えている.排水処理の効果を考慮したこれらの戦略は,従来の救助モデルや排水処理の効果だけを考慮した場合よりも,多くの要救助者を浸水域外に救出することができていた.これは,水上での救助活動では特に移動コストが大きいという実態に対し,浸水範囲の縮小による移動時間の短縮化が実現したためであった.つまり,浸水域での救助活動の弱点を排水処理の効果により適切に補完できたということである.

しかし,この戦略を有効に機能させるには,浸水状況の変化や救助すべき対象者を注意深く検討しなければいけない.たとえば,一時拠点を活用した戦略では,優先的に救助すべき住民を拠点との位置関係や浸水状況の継続日数から判断する必要があった.この戦略は住民を短期的に浸水域外に脱出させるものではなく,長期的に見た場合に,救助者数を最大化することを目指したものである.そのため,一時拠点の利用を軸とした戦略を適切に計画できなければ,浸水域内の要救助者の負担をかえって増やすことになる.逆に,適切に計画が機能すれば,より多くの住民を一定期間内に救出することができる.浸水状況の推移をしっかりと見定め,その環境の変化に適合した救助戦略を検討することが求められる.これらの戦略は,どちらも排水処理の影響を前提としたものである.そのため,排水能力そのものが一定の水準を超えていない場合,浸水状況を十分に改善することができず,結果として上記の戦略の効果が弱まってしまうことに注意が必要である.

これらのシミュレーションの結果から,今後の洪水・氾濫対策においての重要な知見を提供する.現状のところ,大規模な浸水状態や大多数の要救助者の発生後が見込まれる場合,ボートでの救助活動だけではうまく対処できない.従来の救助活動の役割だけで対応する

のではなく、排水作業という別の災害対応活動をも考慮した戦略の立案により、この救助リソースの不足問題を幾分か解決できるだろう。そのためにも、この排水処理作業には十分な能力と機能への信頼性が要求される。そして、それでも救助しきれない住民が存在することに対する対策も重要であろう。こうした観点を踏まえ、今後の洪水・氾濫対策への提言を3つ示す。

A) 排水処理能力の向上と稼働の信頼性の確保

排水処理を考慮した救助戦略により、従来の戦略よりも多くの住民を救出することができるが、それは排水処理が十分な効果を発揮した場合に限定される。実際、今回の排水シナリオはかなり理想的な状態を想定した。洪水発生時には、排水機工場の浸水による機械の稼働タイミングが遅れることや、燃料不足による稼働期間が短くなるリスクがある。そうなれば、一定期間内に浸水範囲を縮小することができず、本稿で導入した各救助戦略がそもそも実行に移せないことになる。シミュレーションで示してきたような戦略の有効性を損なわないためにも、排水処理能力やその稼働の信頼性を維持・向上させる必要がある。例えば、工場・施設の防水性能を高めることや、地域内のインフラが停止した場合に備えて、十分な燃料を備蓄することや非常用発電機を附設することが検討できるだろう。長期的な浸水への現状の対策としては、救助リソースの運用に関する内容が計画の多くを占めている。シミュレーションの結果が示すところでは、救助活動そのものよりも排水処理作業による浸水範囲の縮小効果の方が救助数を増やす上で圧倒的に有利であった。そうしたことも踏まえ、今後は排水処理作業も救助戦略に取り入れるだけでなく、その排水機能が持続的に稼働するようハード面での対策も検討がいるだろう。

B) 救助しきれない住民への重点的な対策

本章では、江東デルタ地帯と呼ばれる具体的なエリアに対し、実大規模の救助シミュレーションを実施した。排水処理作業の効果を考慮した救助戦略により、より多くの住民を救助できることを示せた。一方で、7日間という目標期間ですべての住民を救助しきるには至らなかった。やはり、救助しきれない住民が依然として多く存在してしまうという結果になってしまった。こうした事態に対し一定期間内に救助できない住民への対応策も別途検討する必要があるだろう。たとえば、こうした住民には、前もって避難するように強く要請するという計画が考えられるだろう。しかしこれにも課題が残る。救助が遅れる住民の特徴として、浸水状況が最後まで残るような地域に済んでいることである。そして、今回のケースであれば、その地域は河川からの氾濫が比較的早く到達し、そして浸水想定外に避難するまでの移動距離が比較的長い場所でもある。そのため、避難行動の猶予そのものが厳しい状況にある住民を対象とした対策を検討しなければいけない。江東デルタ地帯を管理する自治

体では、域内の避難所の収容数に限界があることから、域外への避難を要請するように対策をたてている[9]。しかし、当該地域の住民の避難意識には、域外に避難するという意識がほとんど生じていないのが現状である(第5章)。これらの背景を踏まえると、救助ができないと想定される地域に住む住民には、保険などのインセンティブを導入して、避難を誘導するという方策が検討できる。また、一部の住民に限定して避難を要請することで、避難時の混雑や避難所の収容数を圧迫することを回避できる。このように、浸水状況と救助状況の両者をふまえ、より具体的かつ確かなメッセージを住民に提供し、避難を誘導するという対策もできるだろう。

C) ボートリソースの使い道

救助活動という役割を評価する際には、度々そのリソース不足が問題視されてきた。そして、洪水対策での救助活動の改善事項にも、ボート備蓄数のさらなる拡充を目指す内容も含まれている。しかし、今回の救助シミュレーションからわかるように、浸水域におけるボートでの救助活動のパフォーマンスは決して高くなく、そしてリソースを増やしたところで大幅に状況が改善できるものでもない。救助部隊の増員も重要ではあるが、それよりも排水処理作業の人員やハード面の強化にコストをかけた方がよほど効果的であろう。また、ボートのリソースも本当に救助が必要な住民のためだけに利用することで、リソース配分の無駄をなくすこともできるだろう。この点、従来の計画[9]や知見[4]には見られなかった一時搬送拠点の設置を検討することも考えられる。一時的に救出され、特定の建物へ搬送された住民は、その建物の付近の浸水状況が改善されることを待つことになる。この戦略では、要救助者を浸水域外に即座に救出することを目指さず、ある時点における救助者数の最大化を図るものである。シミュレーションで示したように、この一時搬送拠点の設置が適正に行われれば、目標期間内の救助者数をより増やす戦略になりうるだろう。この戦略では、ボートの移動時間を大幅に削減することができるため、少ないボートリソースでも多数の要救助者の安全確保につながられるだろう。このとき、一時搬送拠点の設置場所に関係する浸水期間の長さについては、食料の備蓄状況やライフラインの稼働状況といった救助を待つ住民の生活状態を踏まえて計画する必要があると見てくる。

ボートを用いた住民の救出と搬送という従来の救助活動の役割に加え、排水作業という別の役割の影響を考慮したことで、より柔軟かつ具体的な救助戦略や洪水対策の評価ができるようになったと考える。こうした浸水域における救助活動の限界という事象は、限定された状況において特に問題視されるものであると認識している。それは大規模な浸水状況の発生リスクがあるという地理的特性に加え、直接的な浸水の危険性の低い中高層の建

物に居住している住民が多い都市に限定されるだろう。避難意識アンケートの結果から踏まえるに、浸水被害が住居に届かない場合には住民自身があえて浸水域外へと脱出しようと考えない可能性が高い。そうした認知的な処理の結果、大規模な要救助者を浸水域内に発生させ、救助活動のリソースを圧迫するという事態につながる。

本研究の知見を日本以外の地域へ適用できる可能性は多分にあるが、一方でこれらの浸水リスクに関する状況設定を考慮すべきである。同じく大規模な浸水範囲が想定され、その中で大多数の住民が逃げ遅れると懸念される地域では、本研究が扱った問題に類似した状況に悩まされるだろう。その解決方法には大きく二つのアプローチがある。ひとつは、救助の対象である住民の数を減らすこと、つまりはできるだけ多くの住民には率先して浸水域外に避難してもらえよう働きかけるという方法がある。実際に大規模水害が発生した際に地域住民がどのような避難行動を選択するかは、事前の避難意識調査等から把握しておく必要があるだろう。

次の方法として、今回のような浸水状況を改善させる手立てを用意することもあげられる。排水処理のような活動は、住民の行動よりも制御や予測が容易であるため、より確実かつ強力な打開策になりうる。今回の導入した排水処理モデルは、バスタブ型の地形、つまりは市街地の地形が一つの底を出発して、次第に標高が上がっていくような形状に対し有効である。そのため、それ以外の地形形状に立地する市街地での排水処理をモデルする場合には、また異なったモデルを構築する必要があることに注意が必要である。

これらについて、特に住民に対する避難の誘導政策の有効性は、地域住民の防災意識や日頃の行政との信頼関係にも大きく影響される。これらの内容は地域によって状況が異なると考えられるため、地域ごとに住民や行政への理解を分析し、的確なアプローチを選択する必要があるだろう。

5.6 本章のまとめ

本章では、プラットフォーム上で浸水域における排水処理作業モデルと通常の救助モデルを組み合わせることで、その浸水範囲の縮小効果を考慮した救助戦略を開発した。浸水範囲が変化することを踏まえ、前進拠点の再配置や一時搬送拠点といった新たな救助戦略を導入した。また、実大規模の洪水被害に対する救助シミュレーションを実施し、これらの救助戦略の効果を評価した。結果として、排水処理を戦略に加えた救助活動では従来の救助活動よりも多くの住民を救助できることがわかった。このシミュレーションからの学びとしては、1)排水処理能力の強化とその稼働の信頼性を高めることや、2)救助しきれない住民への重点的な対策、そして最後に3)ポータルリソースの運用方法があげられた。

今後の展望としては、まず排水処理モデルの高度化がある。本章で扱った市街地の地形形

状では、比較的簡易な計算式により、浸水変化の挙動を記述できた。そのため、より複雑な地形に対しても有効な計算モデルを構築する必要があるだろう。その場合、排水能力だけでなく、排水拠点の位置も考慮するも出てくるだろう。次に、救助戦略としての各拠点配置の最適化である。今回は、浸水範囲に沿って恣意的に拠点やボートの配備を設定した。より強力な戦略を構築するには、このリソース配分の最適化も考慮すべきであろう。最後に、今回開発した救助シミュレーションを用いて、行政での具体的な防災計画の立案に活かしていくことも目指していきたい。本稿では救助方針として地理条件に基づく住民の優先的救助を検討したが、他の要素も考慮する必要が出てくるかもしれない。それは、各行政や救助部隊に依然するため、より現場の視点から洪水対策を検討できるようにしていきたい。

—参考文献—

- [1]. Richard H. Thaler, Cass R. Sunstein, “Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness”, Penguin Books, 2009.
- [2]. 広島県：「避難行動を促す啓発事業」.
Available online: <https://www.pref.hiroshima.lg.jp/soshiki/100/keihatsu.html>.
- [3]. 大竹文雄, 坂田桐子, 松尾佑太, “豪雨災害時の早期避難促進ナッジ”, RIETI Discussion Paper Series 20-J-015, 2020.
- [4]. 柿本竜治, 上野靖晃, 吉田護, “防護動機理論に基づく自然災害リスク認知のパラドックス検証”, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.72, No.5, (土木計画学研究・論文集第 33 巻), pp.-I_51-I_63, 2016.
- [5]. 池内幸司, 越智繁雄, 安田吾郎, 岡村次郎, 青野正志, “大規模水害時における孤立者数・孤立時間の推計とその軽減方策の効果分析”, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.3, pp.145-154, 2011.
- [6]. 株式会社ドコモインサイトマーケティング, モバイル空間統計
- [7]. 国土交通省, PLATEAU, Available online: <https://www.mlit.go.jp/plateau/>
- [8]. 国土地理院, 基盤地図情報, Available online: <https://www.gsi.go.jp>
- [9]. 江東 5 区大規模水害対策協議会, “江東 5 区大規模水害避難等対応方針”, 平成 28 年 8 月

第 6 章

災害対応プラットフォームの展望

6.1 デジタル防災のいま

6.1.1 プラットフォームの現状

自然災害は、その発生時期や被災規模を予測することが難しい物理現象である。加えて、大規模災害であれば同じ災害が同地域で発生する可能性は稀であるという性質も備えている。そのため過去の災害からの教訓を活かした災害対策を計画したとしても、それが活用される場面や有効性そのものを検証することが難しいという課題を生んでいる。

日常的に発生している類の社会課題と異なり、防災分野で扱う問題は未知であり実感の湧きにくいモノである。それゆえに、対策そのものを検証するには、シミュレーションのような予測技術を活用していかなければいけない。本研究でも、水害対策の課題を整理・分析する上で、洪水氾濫シミュレーションと人流シミュレーションを組み合わせ使用した。現実世界で直接扱えない課題であるが故に、こうしたデジタル技術を利用するという発想に帰着するのは当然のことに思える。

そうした中、昨今デジタルツインという概念をキーワードに、市街地の仮想化技術やシミュレーションという予測技術、AI 等の意思決定技術を統合して防災課題に取り組むデジタル防災が推進されている。デジタルツインとは、「現実世界を模倣したもうひとつの世界をデジタル上に仮想的に構築し、その仮想世界上で社会課題の影響やその解決策をシミュレートして得られた知見を、今度は現実世界での対策に還元する仕組み」を指す(Fig.6-1)。特に防災分野のように、非日常的にしか発生しない稀有な現象に対してとても相性のよい枠組みである。例えば、デジタル上で仮想的に災害を発生させ、その対策を同時に検討することで、実際に自然災害が発生する前により効果的な対策を練ることができるだろう。

デジタルツインという言葉が注目を浴びる以前より、Society5.0[1]やスマートシティといったデジタル技術を中心とした防災対策が検討されてきた。そうしたこともあり、国や大学、民間企業など、産官学問わずデジタル防災への取り組みが活発になされている。例えば、日本の防災科研が主導して開発を進める SIP4d [2]では、発災時の災害情報を統合管理し、各自治体や防災組織で共有できる仕組みを構築している。また、日本の国土交通省では、都市の 3D データを公開し、デジタルツインの一般利用や推進を目指している[3]。海外に目を向ければ、欧州発の Fiware [4]は地域情報を包括的に管理する仕組みを公開し、どの地域でもデータを収集し、クラウド上で保存、自由な利用を可能とするデータプラットフォームの

基幹技術として注目されている。これらの事例はどれもデータを蓄積するデータベース型のプラットフォームであると思えることができる。IT 技術の発展により、誰もが利用でき管理できるプラットフォーム技術が実現しやすくなっているといえる。

一方で、こうしたデータがどの程度防災分野で有用であったかはまだ議論が進んでいない。この要因として、シミュレーションや AI といった予測・意思決定技術の利活用がまだ不十分であることが考えられる。防災分野においては、データそのものよりも、データから導き出した課題やリスク、そして何よりもそれへの対策を検討することが何よりも大事である。社会の実態を示すデータだけでなく、未知の災害の存在や規模についてシミュレーションを通して明らかにし、AI 等を用いて現実での意思決定をサポートするという部分にまで社会へと技術を浸透させてはじめてデジタル防災が実現されることになる。そのためデジタルツインという枠組みが存在するわけであるが、都市のデジタル化技術はその出発点でしかなく、その先につなぐ技術の発展に焦点を当てていく必要がある。

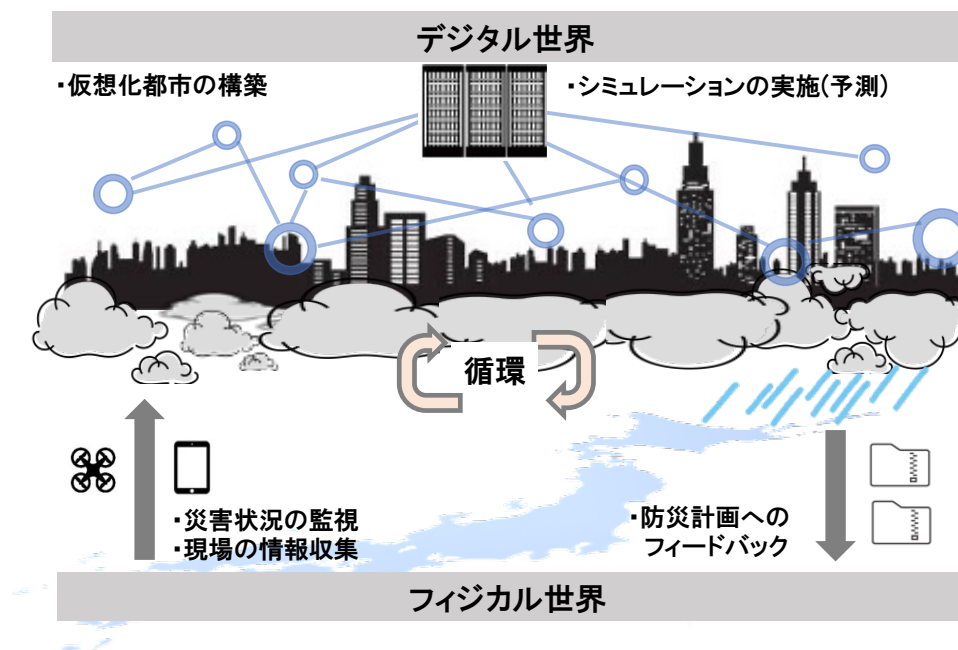


Fig.6-1 防災分野におけるデジタルツインのイメージ

6.1.2 シミュレーション技術の利活用

防災分野では、多くの自然災害シミュレーションが開発されてきた。特に災害の発生頻度の日本においては、多種多様な自然災害を対象とした予測技術が発展してきただけでなく、予測技術を活用してリアルタイムで災害情報を発信する仕組みも導入されている。例えば、緊急地震速報や津波の発生・到達予測、水位センサーを用いた洪水氾濫の検知という情報は瞬時に発信されるようになっている。この背景には、予測技術だけでなく、センシングやデータベースとの連携により高速化・高精度化が実現されている。こうした自然災害

シミュレーションをベースとした災害状況の監視技術の発達は、今日の日本の防災において重要な技術要素となっている。

これらの取り組みは、災害の実態把握に着目したものであるが、ここから延長し、発災前の災害対策や発災時の災害対応への活用にも関心が強まっている。防災分野での最大の目的が、「**災害現象の解明と、有効な対策の検討による、未然の被害予防と人命・財産の安全確保**」であるとすれば、先述の取り組みは、防災分野の一側面を実現したに過ぎない。もちろん、自然災害シミュレーションを用いれば、ハード面での対策の評価は可能である。例えば、建物の耐震性や耐火性能を向上させることで地震や火災の被害を抑えることにつながることや、堤防や河川インフラの強化により水害被害を低減できるといった分析はできる。

しかし、ハード面での強化による防災効果だけに期待すれば、想定外の事態への対策ができなくなるという弱点もある。インフラ等は、一度その機能が崩壊すると、その後の効力の回復をほとんど期待できなくなるという性質があるため、災害被害の抑制対策において柔軟性に欠けている。その場合には、今度は人手による諸々の活動により、被害を低減させるというソフト面で補うことが求められる。そして、そのソフト面の防災対策を評価する仕組みが人流シミュレーションである。

デジタル防災において、未知の災害を扱う道具としてシミュレーションがあるが、自然災害シミュレーションだけでなく、人流シミュレーションと連携して活用することで、ハード・ソフトの両側面での防災対策を検討する術をより発展させていかなければいけない。

6.1.3 意思決定サポート技術へ

自然災害シミュレーションと人流シミュレーションを組み合わせることで、自然災害の被害予測から災害対応の効果検証にまで、技術利用の幅を広げることができるようになった。しかし、この状態のままでは、デジタルツインで期待される現実世界での対策へのフィードバックという機能的側面には十分に答えられていないことに注意が必要である。防災におけるこうしたシミュレーションはあくまでも予測をするものであり、事態への解決策を直接提案する技術ではない。そのため、シミュレーションの結果を踏まえ、適切に内容を解釈し、それを実際に起こる災害への事前の対策やリアルタイムでの意思決定に活かす必要がある。しかし、これらのシミュレーションから得た結果を実際に防災計画に反映させるには、多くの課題を解決しなければいけない。

シミュレーション技術そのものは、予測技術と複数のシナリオ分析を掛け合わせることで今後の防災対策の評価を可能にしている。特にシナリオの設定においては、基本的に専門的な知識に基づいて人手によって災害対応ケースが作成されているのが実情である。しかし、未知の災害対策を検討する上では、人手による操作・分析だけでは限度があることは

自明であろう。

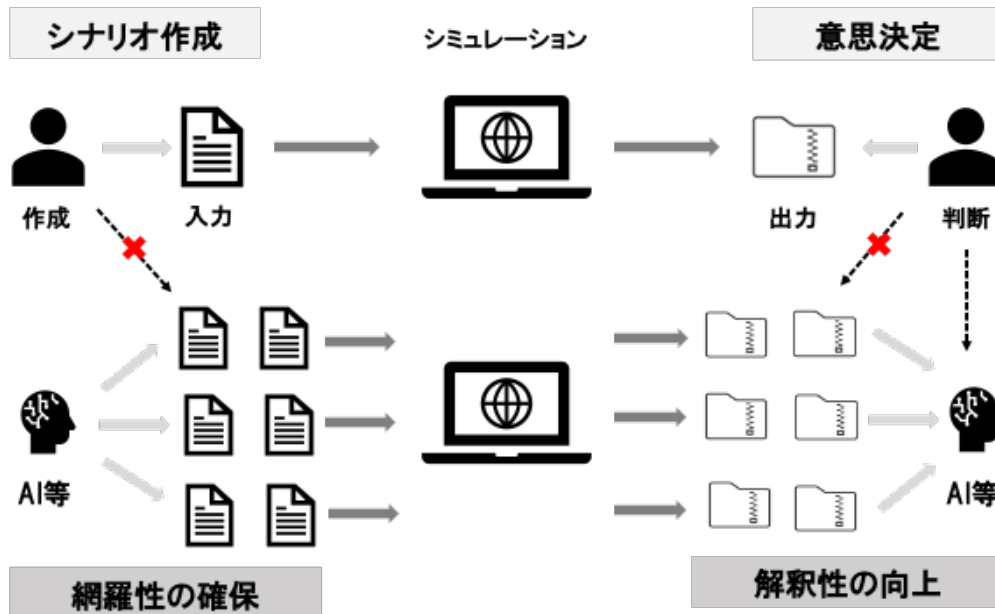


Fig.6-2 シミュレーション利活用における技術課題

シミュレーションを活用するうえでは、1)シナリオ分析の網羅性と 2)結果に対する解釈性、のどちらも技術で支える必要があるといえる (Fig.6-2)。まず、災害への対策を検討するには、災害が引き起こす事態について、限りなく完全な範囲で把握できていることが望ましい。対象とする事態が不明瞭であれば、具体的な対策を検討することはより難解であるだけでなく、不適切な対応により被害を増大しかねない。そのため、災害対策を検討するためにも、できるだけ多くのシナリオ分析を実施し、あらゆる事態に備える姿勢が求められる(網羅性)。そして、そうした膨大なシナリオ分析の結果から重要な対策を導き出すためには、意思決定の主体である人間にとって理解できる形に変換することが必要となる(解釈性)。

この二点を踏まえると、膨大なシナリオを用意することや、その結果から有効な意思決定を導き出すには、もはや人間の能力だけでは困難であると言わざるをえない。そのため、シミュレーションを稼働させる仕組みや結果を解釈する部分にも、AIをはじめとしたIT技術を導入していかなければ、もはやデジタルツインの実現は難しいだろう。もちろん防災分野における意思決定技術については今後の研究が期待される。しかし、そこに至るまでデジタル都市データやシミュレーション技術の活用等、デジタルツインを構成する個々の技術にはまだ多くの課題を残している。そして、技術的な要素だけでなく、それらを利活用するという観点からも、現状の課題を解決する術を検討していく必要がある。

6.2 デジタルツインとプラットフォーム

6.2.1 プラットフォーム化の必要性

前節では、デジタルツインの枠組みに則りデジタル防災を実現する上で、現状の技術やその利活用の課題をみてきた。防災分野におけるデジタルツインを構築するための個々の技術については独自に開発され、現在に至るまで発展が続けられている。技術そのものが存在する一方で、いまだ災害対応での意思決定をサポートする仕組みが完成されていない理由はどこにあるだろうか。

この疑問に答えるには、技術の性能や精度そのものではなく、その技術を活用するユーザー側の視点から考えてみるべきであろう。まず、ユーザーにとってデジタルツインを通じて実現したいことは、A)自然災害の脅威を確認することであろう。そして、その期待に答えられるよう、B)多様なユーザーからの要求に柔軟に応えられる”懐の広い”ツールでなければならない。そして最後に、ユーザー自身が直接操作・解釈ができるような C)簡便性・利用可能性の高いシステムでなければならない。ユーザー自身のニーズからこれらの技術要求を抽出した場合、今度はデジタルツイン上のシミュレーション技術はどのようなシステムであるべきか議論していく。

1 点目の要求は、従来のシミュレーション技術への期待そのものである。シミュレーションは、ある入力を与えることで、何らかの出力を得る機構を備えている。そして、その出力内容が、ユーザーの期待通りのものでなければいけないというのがこの要求の重要な点である。この要求に答えるには、将来の自然災害の予測だけでなく、その影響がユーザー自身にどの程度及ぶのか、その対策として何をしなければいけないのか、災害対応の当事者自身の関心事に即した回答をシミュレーションから取り出すこととなる。災害それ自体を把握するだけでなく、人間や社会へのインパクトを評価する技術にするには、1)データの収集による具体的な地域や災害を対象に、2)シミュレーションの実施し、3)その結果からの意思決定、という各プロセスを IT による自動化、あるいは人手によって管理することが求められる。

Fig.6-1 に示すように、防災でのデジタルツインを構築するには、それぞれの個別技術が適切に連携され、技術間でデータの伝達が円滑でなければいけない。このサイクルのなかに部分的なボトルネックでも発生すると、デジタル空間上での予測結果から現実世界へと知見をフィードバックする仕組みが稼働しなくなってしまう。それを避けるためにも、**関連する技術を一貫した視点に立って改めて組み直す必要性**があると考えられる。

次の 2 点目の要求では、1 点目へのシミュレーションの出力結果を、より多様な要求に対応させようという試みが求められる。災害対応活動には、行政や企業、住民等のさまざまな

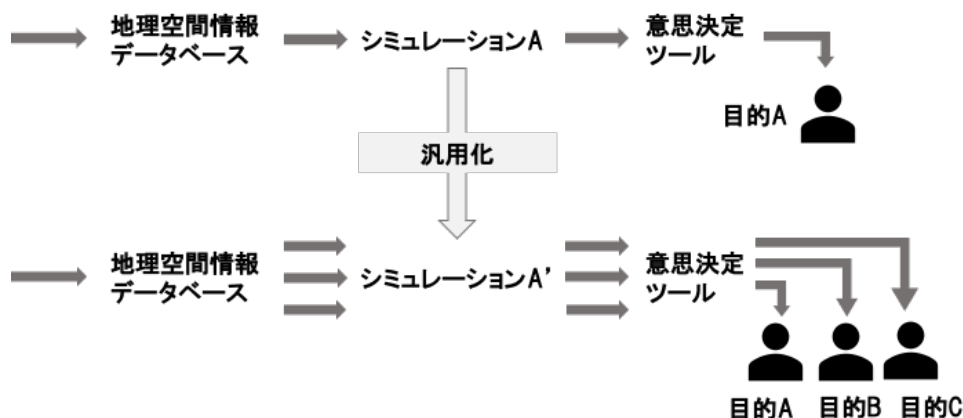


Fig.6-3 ユーザーの要求に沿ったシミュレーションの構成①

ステークホルダーが関与しており、その活動それぞれが異なる役割や目的意識を抱いて取り組んでいる。各ステークホルダーが目指す方向が異なる以上、当然シミュレーションから取り出したい出力結果も違ってくると想定される。デジタル防災を実現する上でこうした包括的なシステムが要求されるようになったと同時に、そのシステムを利用するステークホルダーの種類・数が増えていることにも技術として対処していかなければいけない。

通常の研究開発であれば、特定の専門家が、特定の災害・問題を追求するためにシミュレーションの機能を決定してきた。そのシミュレーションの構造や入出力のデータは事前に決めた課題設定に特化したものが多く、別の災害や地域、異なるステークホルダーの要求全てに対応できるほどの汎用性までは考慮されていない。そのため、個々の事象・地域に特化したこれまでの技術アプローチでは十分に応えられなくなっているといえる。

こうした多様化する要求への素直な解決策としては、ひとつのシミュレーションからステークホルダー全体の要求を網羅できるほどの結果を出力できるように前もってシミュレーションの内容を変えることである。その結果、プログラム量が増大することや、別の機能や技術を新たに導入するという作業が発生することとなる。それを負担するのは、あくまでも開発者自身であるが、より大きなソフトウェアとなったことで、より多くのステークホルダーの期待に応えることは可能になるだろう。

そして最後の3点目は、シミュレーションの利用を、その開発者自身だけでなく、第三者でも不自由なく扱えるようにしたいという要求である。2点目の要求でも述べた通り、従来のシミュレーション利用場面では、主に専門家が特定の災害や地域、シナリオに限定して計算操作や分析を行ってきた。そして、自然災害のリスクや災害対応上の課題意識は、地域によって千差万別であるため、防災対策の基本は地域ベースで実施することが要求される。この二つの観点を合わせると、全国の地域でシミュレーションを用いたしつかりとした防

災対策を計画するためには、地域ごとに専門家主導でシミュレーションを構築していかなければいけない。しかし、専門家や、あるいは個々のシミュレーションの処理内容に精通している人材は限られており、全ての地域・自治体・組織に介入することは困難である。

そうした理由により、デジタルツインに基づく防災技術を全国的に展開するには、もはや技術の開発者以外の第三者自身が積極的に扱える仕組みが必要となるだろう。実際のところ、防災意識上の課題には専門家依存や当事者自身の自発性の欠如が度々注目されているが、そうした課題への解決策としても災害対応の当事者自身がシミュレーション技術を扱える状態にしておくことが望ましい。

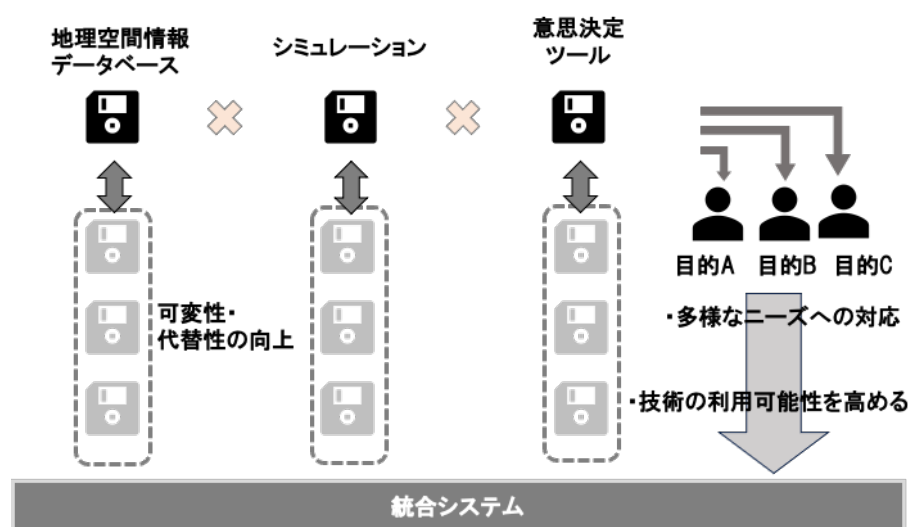


Fig.6-4 ユーザーの要求に沿ったシミュレーションの構成②

専門家でもない第三者がシミュレーションのような高度な技術を自由に扱えるようにするには、まず技術そのものへのアクセスを容易にすることが重要であると考え。そのためには、これまで個々の事象に特化されてきたシミュレーション技術(アプリケーション)を、一つのシステム上で統合し、その巨大なシステムのアクセス権だけをユーザーに渡すという体制を整えることを考える (Fig.6-4)。

専門家や開発者が自身の成果であるシミュレーションを普及するのとは異なり、ユーザー一視点ではそのシミュレーションを取捨選択し、必要に応じて組み合わせるといった扱いができるほうが、ユーザーの要求を応える上で有利である。たとえ、同じ災害を対象としたシミュレーションであっても、計算時間や精度、出力結果等の違いから、その技術選択には多くのオプションが存在している。また、異なるシミュレーションごとに、異なる操作やデータの準備、結果の可視化・解釈を要求されることはユーザーにとって大きな負担になる。

そのような背景から、さまざまな機能をひとつのシステム上で提供でき、また完結でき

るようにしておくことは、デジタルツイン技術の普及に欠かせないと考える。中でも、このシステムの将来的な拡張性や持続性を考慮すれば、災害対応での課題を扱う上で重要な要素であるシミュレーション技術をシステム上のパーツとして取り替えや更新ができる技術に落とし込むことを重視すべきである。それにより、状のシミュレーションが、ステークホルダーの要求に応えられるものでなくなれば、新たに改善されたシミュレーションで置き換えることもあれば、精度が向上した別の技術と入れ替えること検討できる。

こうした技術の更新性・代替性を確保しながらも、専門性を問わないあらゆるステークホルダーが利用できる仕組みをデジタルツインで構築していかなければいけないと考える。このシステムのうえでは、ただ一つの特定の目的だけに特化したシミュレーション(アプリケーション)ではなく、複数のシミュレーションを活用し、ステークホルダー自身が関心のある課題への知見を得られる機会を提供するだろう。そして、この仕組み自体が特定の組織・個人によって管理されるのではなく、利用者全体で技術が利用・更新され、持続可能なシステムとしてデジタル防災を支えていくことを期待できる。こうした仕組みをもとに、災害対応シミュレーションを中心としたプラットフォームを提案する。

6.2.2 地理空間情報ベースの災害対応シミュレーションプラットフォーム

プラットフォームとは、「①関心のあるモノゴトに対するソリューション(機能)をユーザー自身で自由に利用することができ、自身の問題意識の解消や新たなサービスの開発できる場を提供する。また、②ユーザー同士がそのサービスを世間に公開することで、新たなアイデアやサービスをユーザー自ら創発し共有できる共創の場を提供する」ものである。この“プラットフォーム”という言葉に対する世間的に認知された明確な定義を与えることはできないが、前項で説明したユーザー体験を有するシステムとしてここでは暫定的に定義している。

さて、このプラットフォームの定義に沿ったデジタル防災の全体像は、「災害対応に関心のある各ステークホルダーが、これまで高度な技術であったシミュレーション等を不自由なく操作できる環境を提供し、各々の課題意識に対する知見をデジタル空間から取り出すことにより、防災計画や日々の対策に活用することや新たなビジネス・サービスの開発に導入することを可能とした仕組み」にするものである。そうした活発的な共創のための仕組みをデジタルツインの枠組みを用いて構築することで、未知の現象である災害への対策・対応方法を日常的に検討できるデジタル技術へと昇華することができる。そのコアとなる工夫が、これまで特定の人物でしか扱えなかった高度なシミュレーション技術を一般利用に適した形で提供することである。その結果、全国どの地域でも、またどのようなステークホルダーでも、自身の観点や意思を用いて取り組める災害対応を考える機会が生まれ、

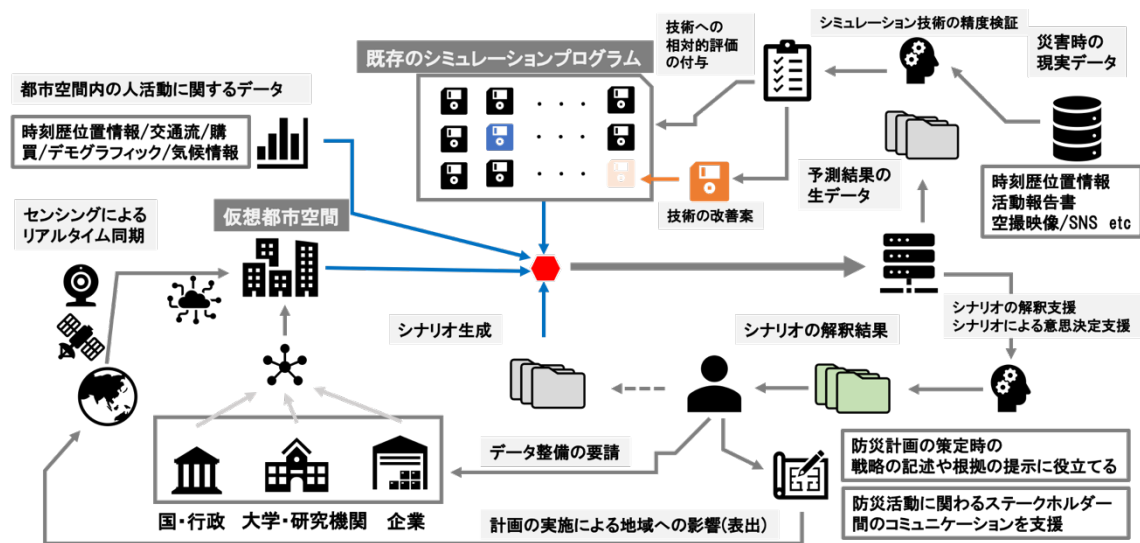


Fig.6-5 災害対応プラットフォームの構想

専門家なしでも防災への意識を高めることができる自発的な活動を促進することにつながる。

こうした観点に沿って、本研究で提案する災害対応プラットフォームの全体像を Fig.6-5 に示した。この災害対応プラットフォームを利用するユーザーが体験するストーリーを以下に述べる。

- 1) まず、プラットフォームにアクセスしたユーザーは、関心のある地域のマップを画面上で選択する。マップは市街地や自然地形に関する 2D(あるいは、3D)データが全国規模で事前に構築されており、ユーザーは自身で計算領域を自由に区切ることができる。マップには、さまざまなデータが格納されており、どのシミュレーションであっても入力データを漏れなく準備できる状態となっている。他にも、交通流や気候条件、人口データといった市街地に関わるデータも付随している。なお、これらのデータは各組織・個人から提供されており、ユーザー自身の独自のデータで置き換えることも可能である。
- 2) マップを選択後は、災害対応の具体的なシーンを想定し、該当するシミュレーションプログラムを選択することになる。特定のシミュレーションが選択されると、マップから必要な入力データが自動で抽出され、シミュレーションの計算準備が完了する。この状態では模範的な計算条件やパラメーターが既に入力されているが、ユーザー自身がシナリオ作成を行うことも可能である。シナリオ作成のノウハウやアイデアに乏しい場合は、他者のシナリオを利用することや、AI によるシナリオ作成機能を活用してもよい。
- 3) シミュレーションの結果、あるいは途中経過の様子は、ファイル形式で出力されるだけでなく、画面上の 2D(あるいは、3D)マップで可視化することもできる。画面からの直感的な理解

も可能であるが、シナリオ分析のためにデータをダウンロードすることもできる。その際には、使用したシミュレーションプログラムや設定条件等がわかりやすい形でまとめられた計算実行証明書が発行される。これは、得られた計算結果に対する品質や精度の信頼性を保証するものである。

4)ユーザーはシミュレーションで得られた結果そのものや、その結果への根拠を用いて、防災計画や新サービスを考案することができる。結果そのものは専門性の高いプログラムから出力されているため、分析データを用いてより高度な議論ができる。実施したシナリオが膨大であり、人手では解釈が難しい場合は AI による分析・意思決定ツールを活用することも検討する。一度のシナリオ分析を終えて、また別のシナリオ分析を行う場合や、導入予定の施策の防災効果を検証する場合には、再び新たな条件でシミュレーションを開始する。

5)プラットフォーム利用で感じた不満や要求は適宜対応される仕組みとなっている。例えば、シミュレーションへの新たな入力データやデータの最新版への要請をユーザーが送ることができる。また、蓄積されたシナリオ分析の結果と、実際の災害状況・災害対応のデータを比較する機会があれば、既存のシミュレーションプログラムの精度を検証することもできる。必要に応じてプログラムの更新や改善プログラムへの置換がなされる。こうした更新性を確保することでプラットフォームそのものが常に進化していく工夫が施されている。

プラットフォームという仕組みが、通常のソフトウェアプログラムと異なる点は、その持続可能性の高さにあると考える。ユーザーの要求は日頃進化しており、サービスを利用するなかでも新たな要求が生まれることもある。シミュレーション技術をはじめとするデジタル技術やそこで使用されるデータは、常に最新の状況に対応できるよう更新続けることが求められる。通常のソフトウェアプログラムでは、その更新の負担は開発者自身に集中することになる。一方で、プラットフォームでは、更新作業をユーザー自身も担うことができ、負担の分散と同時に、迅速な対処も期待できる。

プラットフォームによる解決を目指す社会課題は、とても複雑で難解な現象であり、そのリスクや問題構造も変化している。それに応じてプラットフォーム自体も、ただ存在するだけでなく常に更新され、持続的に駆動する仕組みでなければいけない。このプラットフォーム上で展開されるデジタルツインのサイクルが回り続けるためにも、より多くのユーザーを惹きつける技術を目指すべきだろう。

6.3 プラットフォーム構築の機能要件の整理

前節では災害対応プラットフォームの構想を提案し、それを利用するユーザー視点から、プラットフォームで得られるデジタル体験を説明した。本節では、そうしたユーザー体験

を実現する上での、技術的な機能要件をより詳細に整理していく (Fig.6-6). その観点として、専門家でない第三者であっても、防災上のシミュレーションを自由に活用できる仕組みを構築するにはどのような技術や仕様が要求されるのかを考えていく. 特に、本研究がこれまで扱ってきた自然災害・人流シミュレーションの利活用だけを想定し、シナリオ結果による意思決定プロセスについては省くものとする.

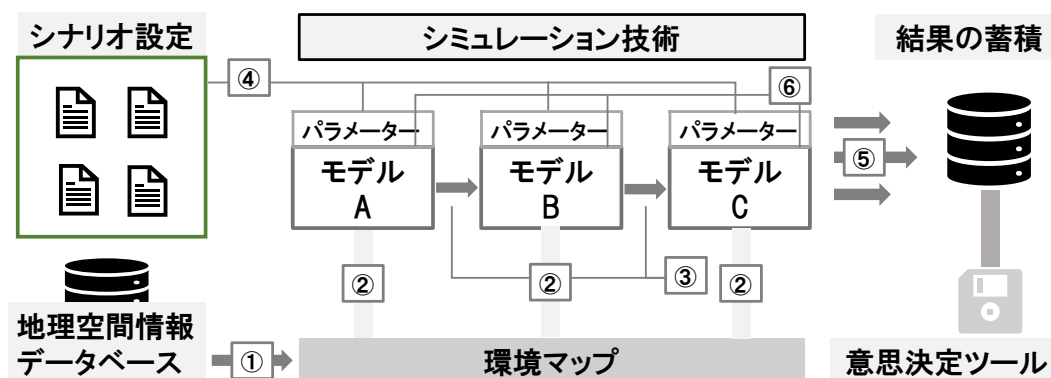


Fig.6-6 災害対応プラットフォーム上の機能要件の検討

① まず、シミュレーションを稼働させるための環境マップを事前に用意、あるいは自動で生成する仕組みが必要である。災害対応におけるシミュレーションを実行するには、市街地や自然地形の情報を欠かすことができない。また、世間的に公開されている地理空間情報は、シミュレーションへの入力データに適した形式・構造ではないことが多い。そのため、シミュレーションの運用の際には、一度収集したデータを加工するという作業が伴う。しかし、この処理内容はとても高度であり、シミュレーション開発者以外の第三者が取り組むには作業コストが高い。実際、世間で公開されている都市規模のシミュレーションツールには、プログラムだけが用意され、環境マップの作成はユーザーに依存しているものも多い。この状態では、シミュレーション利用への大きな障壁を残してしまう。

② その環境マップには、使用できるシミュレーション全てへの入力データを網羅できほどの情報を含めなければいけない。災害対応を検討する際に使用する自然災害・人流シミュレーション等には、さまざまな計算モデルが存在している。計算モデルの違いがシミュレーション全体の挙動や性能を大きく左右する要素となっているが、モデルごとに使用する地理空間情報内容や形式が異なってくるのが一般的である。例えば、第3章で人流シミュレーションの環境マップを検討した際に、人行動モデルの違いによる道路データ表現の扱いが異なっていたと示した。そのためユーザーがさまざまなシミュレーションを扱えるようにするには、その全てのシミュレーションが要求するデータを環境マップに用意されているべきであろう。そのためには、各シミュレーションでの入力データを包括した入力

群データを事前に整理し、それに基づき①の環境マップを生成することが求められる。その際に、同じデータであっても表現方法の違いを考慮し、情報量・精度を段階別に用意することも念頭におく。

③ 使用するシミュレーション間の入出力データの整合性を確保し、円滑なデータ伝達を実現する。近年、災害や災害対応は複雑性を帯びており、同時にその現象の理解においては複数のシミュレーションを併用することが必要になっている。その際に、シミュレーション間で入出力データのやりとりをしなければいけない。このデータのやりとりにおいて、必要なデータが欠けていると、やはりシミュレーションが途中で停止することになる。滞りのないシミュレーション運用のためにも、各シミュレーションの連続性を向上させることが求められる。従来のシミュレーションでは、特定の用途のために使用され、その入力データ、出力データの内容・形式も恣意的なものが多い。プラットフォーム上でシミュレーションをまとめる際には、お互いに共通したフォーマットに基づくデータ伝達が可能なシステム設計に注意しなければいけない。

④ シミュレーションの準備を終えたら、今度はシミュレーションの計算条件を適切に設定する必要がでてくる。環境マップを構成する地理空間情報と同様に、この計算条件はシミュレーションの出力結果に大きな影響を与える。適切なシナリオ設定のもと、正しいパラメーターや計算条件を用意しなければ、有意義なシナリオ結果を得ることができない。一方で、巨大なシミュレーションプログラムのなかで膨大な設定項目が存在する場合、計算条件を選択すること自体がより困難な作業となる。限りなく無限に近い計算条件の組み合わせのなかで、ユーザーにとって価値のあるシナリオを選択できる仕組みが必要となる。その際には、ベースとなるシナリオを事前に用意することや、他者のシナリオ設定を模倣するというシミュレーション運用の敷居の低さを確保することや、AI等を用いてシナリオ作成を自動化する機能を提供することになる。

⑤ シナリオ結果を集積していくためのデータベースを用意し、今後のシナリオ分析や非常時の意思決定に役立てる仕組みを整えることも重要である。莫大なシナリオ条件に対し、シミュレーションから導き出される結果も無数に増えていくことになる。シミュレーションの利用目的が、導入する対策の有効性を評価するというものであれば、複数のシナリオを比較検証することになる。その場合、膨大な計算結果を対処するには、AI等の機械的な処理にも頼る場面が出てくるだろう。また、過去の地点の計算結果を改めて確認するという場面も想定される。シナリオ設定やその結果をまとめて管理し、今後の利用に備えることも、シミュレーションの利用価値を高めることにつながる。実際、津波シミュレーションでは、複数の計算結果を事前に用意し、非常時にはその結果から現実に近い状況のシ

ナリオを検索することで、津波到達警報の発信高速化を実現している。

⑥ これらのシミュレーションそのものの信頼性を高めるため、**開発者や所有者の一意性を管理するセキュリティ機能**も用意が必要であろう。防災分野においては、人命に関わる規模の問題を扱うことになり、シミュレーションの挙動にも一定の精度が求められる。プラットフォーム上では、シミュレーションの利用やデータが自由に公開されるため、使用される技術やデータにはより一層の信頼性が要求される。そこで、間違っただシナリオ設定による計算結果が世間に誤解を招くような事態や、オリジナルのプログラムを改変したシミュレーションが問題のある動作を示した場合、何よりもシミュレーションやデータ提供者への信頼が損なわれることになる。シミュレーションが適切に運用され、信頼ある技術でありつづけるためにも、プラットフォーム上の各要素の責任の所在や所有権を明確に保持する仕組みがなければいけない。例えば、ブロックチェーンを基盤としたデータやプログラムの管理体制を整えることが検討できる。

6.4 水害対策用のシミュレーション型プラットフォーム

6.4.1 本プラットフォームの成果

ここまで防災デジタルツインの実現を目指した災害対応プラットフォームの構想や、実現に向けた機能要件を考えてきた。本章の最後に、本研究で使用した水害対策のシミュレーションをプラットフォームとして構成した事例について説明する。

自然災害のうち、特に洪水氾濫に限定した場合でも、災害対応には多くの活動フェーズが含まれ、それらを担当する各ステークホルダーも多種多様である。本研究ではその中でも住民の避難行動とボートでの救助活動というふたつの災害対応フェーズにのみ着目し

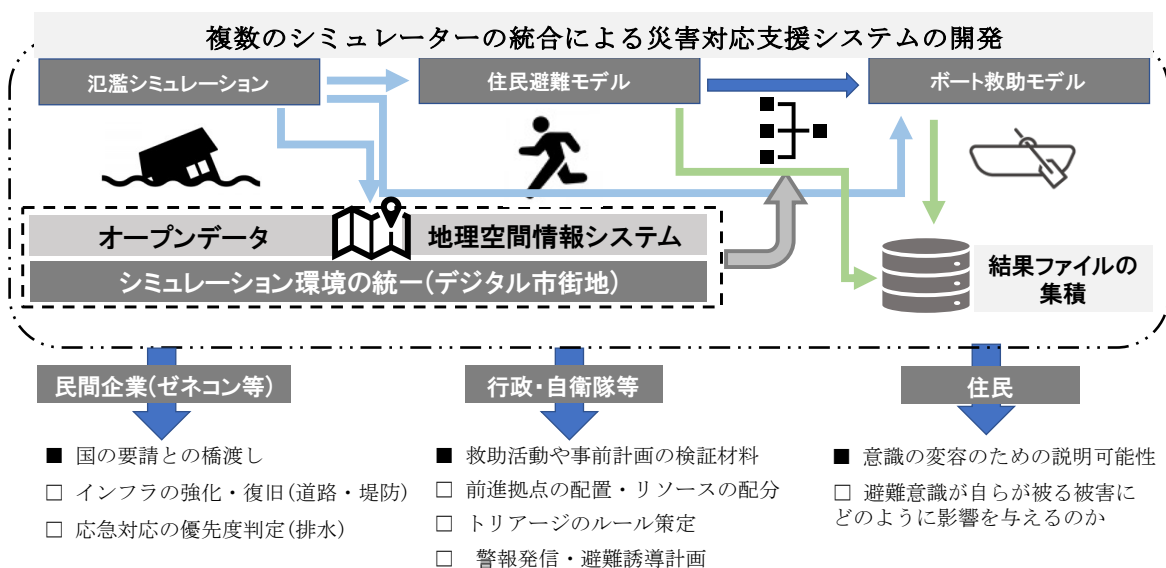


Fig.6-7 水害対応プラットフォームの概要

てきた。シミュレーション上でそれらの挙動を表現するために、活動主体をエージェントシステムで構築し、より柔軟で自由な活動モデルを実装した。また、活動主体が災害状況に応じて行動・判断を変えられるよう、洪水氾濫シミュレーションの結果をも取り入れ、エージェントが活動する環境の変化を再現した。これらを技術的な側面を振り返ると、本研究の過程で複数のシミュレーションを活用したといえる。しかし、個々のシミュレーションを個別の目的のために利用するのではなく、あえて複数のシミュレーションを連携させることにより、異なる役割のステークホルダーの関心に答えられる、より柔軟なシステムを構築してきたといえる。

従来の(あるいは各章で個々に構築した)シミュレーションは、特定の課題に対する詳細な分析を実施するために、住民の避難行動や救助活動等の個別の災害対応に焦点を当てて開発されている。これらのアプローチは、特定の課題領域に対する回答を引き出せるが、その他の領域には一切関与することができない。たとえ、避難シミュレーションを実施したとしても、救助活動がどのような結果になるかはその場で予測ができない。こうした個別の領域に特化されたシミュレーションは、個々の災害対応の問いに答えられるものの、横断的な視点での解を提供することができない。本研究の問題意識に立ち直ると、激甚化する水害への対策では複数の災害対応を踏まえた協調的な取り組みが必要であろうと述べた。しかし、災害対応間の連携に対する分析手段を個別のシミュレーションだけでは用意できない。高度なシミュレーション技術を用いて防災計画を立案するという取り組みに期待が寄せられているが、ひとつの活動や役割だけで対処ができる災害状況には限界がある。そこで災害対応活動間の連携が求められるのだが、自身の活動の範疇を越えた他の活動の役割や効果を直接理解することはより困難である。

そこで、Fig.6-7 に示すような水害対策全体を俯瞰的に捉えるシステムを構築するに至った。プラットフォーム上で様々なシミュレーションツールを提供することで、各災害対応の様子を自由に分析・予測することを可能にする仕組みを考案した。図に示すように、このプラットフォームでは、水害被害を受ける可能性のある住民や、対策を考える行政側(救助部隊)やその際に協力要請を受けるインフラ企業等を利用者として想定している。水害対策に向けてこれらの各ステークホルダーは各々の立場から関心のある知見を得ようとするものとする。今回の洪水・氾濫対策向けのプラットフォームでは、災害に対する行動を起こす主体あるいは活動として、住民の避難行動やボートの救助活動、そして排水処理作業に関するモデルをそれぞれ配置している。これらのモデルを単一で、あるいは複数用いるで、俯瞰的な視点での洪水・氾濫対策を検証できるシステムを自由に組み立てることを可能にした。本研究の各章では、これらのシステムを用い大規模洪水発生に向けた対策を住民視点や救

助視点で模索するという試みをした。その際には、課題を定義したうえで、ナリオ分析の目的を定め、プラットフォーム上のどのモデルを用い、どのようなデータを用意し、そしてどのような出力結果を得られるのかを説明している。

まずシミュレーション環境や各活動モデルを事前に定義し、分析のために必要な機能・データをこのプラットフォームに用意した(2章)。次に、分析対象となる地域へのアンケート結果を踏まえ、洪水対策上の課題を把握した(3章)。具体的には、まず住民側の視点として、住民の避難意識のなかに救助を見据えた行動ができない可能性があることから避難行動や避難計画を見直す必要があるということが挙げられる。もうひとつは、救助側の視点として、長期浸水想定地域内の住民がほとんど残ってしまうことから、全ての住民を一定期間内に救助しきれないというものである。プラットフォームでは、このアンケートの結果をデータとして取り入れ、また次章以降の課題認識として利用した。まず、住民側の課題に対するアプローチとして、浸水域での救助活動中の住民の負担内容・度合いを救助シミュレーションで把握した。また、その対策を住民の避難行動と救助活動のシミュレーションを時間的に連続させて運用することで検討した(4章)。また救助側の課題に対するアプローチとして、救助モデルと排水処理モデルを組み合わせ、排水処理作業の効果を考慮した救助戦略の立案や有効性を評価した(5章)。

6.4.2 プラットフォームによる洪水・氾濫対策の新知見

このように、プラットフォーム上では、住民や排水処理といった救助活動とは異なるステークホルダーの役割を救助活動のなかで考慮できるようになった。住民の避難や排水作業を連携させることにより救助活動の限界という課題に対する対策検討できること、そしてその解決の糸口を他の活動フェーズから見出せるようになった。今回救助活動の限界という課題に対して本プラットフォームを利用したがそれ以外にも、住民への防災教育ツールの要素として救助活動の挙動を取り入れることもできる。あるいは、排水処理作業を管理・実施する組織が救助部隊との意思疎通のための手段として本プラットフォームの結果を活用することもできるだろう。多様なステークホルダーに影響を与える大規模水害対策に対して、共通の問題意識をプラットフォーム上で提示し、多角的に議論を進められるよう支援するツールとなっている。

次に、既存の洪水対策事例と比較し、本研究により得られた知見の新規性、つまりはプラットフォームを利用することの価値について議論する。1章で述べたように、本研究が課題として取り上げてきた長期浸水域における救助活動の限界に関する問題意識は、既に水害リスクの大きい地域の防災計画にも取り上げられている[5,6]。高知県では、南海トラフ地震に伴う津波によって発生する長期浸水に対し、住民への長期浸水被害対策の周知や救助計

画の見直しを行なっている[5]. 東京都江東 5 区では, 大規模洪水の発生による長期浸水に備え, 救助計画だけでなく, 住民の広域避難を誘導する計画を策定している[6]. これらの計画は長期浸水域における救助活動の限界にもとづき, 要救助者の削減や浸水域内での避難生活者への支援を目標にしている. その対策の基本要素を, 救助活動の戦略と住民への働きかけに分けて整理する.

・救助活動の戦略

長期浸水域での洪水対策では, まず救助活動そのものの戦略を見直すことが優先されている. 例えば, 高知県では潮の満ち引きによる住民の自主的避難の可能性を考慮し, 地理形状に合わせた救助リソースの優先投入計画をたてている. そこでは住民が特定の避難施設に集合していると想定し, 地域内の施設の分布に応じて進出拠点(前進拠点)や拠点あたりの救出数を算定している. また, 各拠点からの一日あたりの救助可能数を簡易的に設定し, 要救助者全員の救助に必要な時間を算出している. 同時に, ヘリでの空路搬送の手段も並行して計画している.

次に江東 5 区では, 大規模な要救助者の発生に対し, 排水処理を考慮した救助方針を計画している. 排水処理作業により自主避難が可能となった住民を救助活動の対象から除くことで救助リソース配分の効率化を実現し, 一定期間内の救助完了を目指すものである. この地域の計画では, 高知県の計画よりも要救助者と救助の進出拠点の位置関係を詳細に計算することで救助時間の算定を行っている.

・住民への働きかけ

救助方針をより洗練化することで, 大規模水害への対策を改善するという上記の方法にも限界がある. 特に都市部での莫大な人口を抱える江東 5 区においては, 救助活動の改善等のみでは対処しきれないこともわかっている. そこで, 要救助者となり得る住民自身に対し, 事前避難の誘導や救助待機期間中の援助を計画している.

例えば高知県の計画では, 津波避難ビルへのボートを含む物資供給や, 安全な浸水域外避難の誘発するよう災害リスクの周知活動を行うものとしている. これらは当計画内に示されたアンケート結果で津波被害リスクについて回答者の意識が薄いことが示されたことを受けての対応となっている.

次に江東 5 区では, 前提として住民の広域避難を誘導する方向性に絞りそのための対策を練っている. これは, 要救助者の発生数を減らすと同時に, 浸水域内の避難施設の容量上限を考慮し, 可能な限り多くの住民を浸水域外へと避難させ, 避難の難しい要医療者等にだけ救助の対象を限定したいという狙いからである. 例えば, 広域避難では江東 5 区外に出るために長い移動時間がかかることから, 余裕をもった避難誘導情報の発信や車両避難

の併用を検討している。しかし、自宅から離れていくことへの抵抗感が高まる可能性から、江東5区外にも安心して避難できる場所の設置や避難にかかるコストを低減する方針をたてている。また、垂直避難を選択した住民が滞在しているビルにゴムボートを配給することで自主避難を要請することも検討されている。

Table.6-1 現状の長期浸水対策の整理

	避難	救助
事前	<ul style="list-style-type: none"> ・水害リスクの周知 - 江, 高 ・広域避難のための避難所整備 - 江 	<ul style="list-style-type: none"> ・浸水状況に合わせた救助順位の設定 - 高 (江東デルタにおいては 具体的な計画が不明) ・要救助者の限定とリストの作成 - 江, 高 ・救助時間の算出が 数式計算による - 江, 高
対応時	<ul style="list-style-type: none"> ・早期避難の誘導(広域避難) - 江 	<ul style="list-style-type: none"> ・ボート到達不可能地域へのヘリ輸送 - 高 ・住民の自主避難(潮の満ち引き) - 高 ・住民の自主避難(ボートでの) - 江

これらの地域防災計画を俯瞰すると、本研究と同じく長期浸水域における救助活動の限界を認め、その課題に対する対策を多面的に検討しようと試みていることがわかる。そこで、本プラットフォームでの分析における優位性はこの対策の“具体化”にあると考える。

まず救助活動の観点で述べると、マルチエージェントシステムで実装したプラットフォーム上の救助モデルを用いることで、より具体的な救助活動計画を検討できるようになっている。例えば、前進拠点の設置やボートリソース数の配分も自由に設定できることから、想定される要救助者の分布に応じた戦略を立てることが可能である。この点、高知県の計画では要救助者と進出拠点の位置関係は明確に求めず、また救助能力にも概算値を与えている。4章でみたように、浸水域でのボート救助活動では、移動速度やボート容量の制約から、全体の救助完了時間が要救助者の避難状況に大きく影響を受けうる。実際、この要救助者の滞在場所という情報は特に浸水域での救助活動において重要な情報であろう。また、要救助者の属性(健康状態等)といった情報を救助戦略に考慮できることから“質”の面でも救助活動の評価できるようになった。また、この詳細な救助活動の動態を把握することで、例えば要医療者のその後の搬送計画を策定する上で有用な出力結果を取得できる。マルチエージェントシステムによるモデル表現力の向上により柔軟かつ詳細な救助活動計画を描けるようになったといえる。

この点をさらに補足すると、排水処理の効果を踏まえた救助戦略の立案を経て、より具体的かつ的確な避難対策も検討できた。例えば、排水処理作業によって浸水範囲が次第に

縮小することを見込んだ進出拠点や一時拠点の配置戦略により、従来よりも多くの住民を救助できることが判明した(5章)。浸水状況の変化を救助計画に考慮した事例は、高知県・江東5区ともに当てはまるが、両方とも変化に積極的に適応した具体的な計画が存在しているわけではない。特に江東5区の計画では排水処理の実施効果を評価しているものの、進出拠点や一時拠点の配置戦略といった具体的なシナリオを検討しているものではない。

これは地域防災計画では、浸水状況の様子を静的に捉えているのに対し、プラットフォーム上では動的な処理として浸水状況の変化を反映しているという違いによるものである。5章で扱ったように、プラットフォーム上では排水処理モデルによって浸水状況の変化が可視化され、その様子を俯瞰しながら救助モデルでの入力データを決定することができる。つまり、想定される排水処理シナリオに応じ、柔軟な救助戦略を反映することができる。排水処理の効果を最大限救助戦略に取り入れることで、救助計画及び避難対策に新たな知見を得た。まず救助活動においては、ボートによる救助能力が排水処理の効果よりも圧倒的に劣ることから、ボートリソースの運用に注意が必要である。救助計画の策定では救助リソースの補強もひとつの議論点となるが、本プラットフォームで実施したシナリオ分析では、ボートリソースを増やすよりも排水工場の稼働率を高めることを優先すべきであると示された。この知見によれば、江東5区で検討されている住民へのゴムボートの配給よりも、排水工場への人員搬送等のインフラ整備にリソースを割り当てた方が有効である。

また高知県での計画同様に、浸水状況が深刻な場所の要救助者にリソースを優先させることで、一定期間内の救助数をより改善できるシナリオも見出せた。これは避難対策の観点では、より重点的かつ強力な避難誘導を行うべき対象を絞りこめたといえる。江東5区では避難できる住民は可能な限り広域避難(浸水域外避難)させる方策を練っているが、3章のアンケート結果からもわかるように、ほとんどの住民が広域避難へ態度変容させるにはまだまだ多くの課題を解決しなければいけない。そうした状況下で、代替案として即応的な救助はせずに、一時拠点を活用しながら一定期間内の救助数を最大化することも検討できる。その際には、比較的早く浸水状況が解消される場所の住民には一定期間の食料備蓄を用意してもらい、長期の浸水状況の継続が見込まれる場所の住民に限定し、避難誘導を強く実施するというアプローチの使い分けができそうである。真に救助、あるいは避難すべき住民を算出することで、江東5区の計画で懸念されていた避難施設の容量上限問題や避難経路の混雑問題も緩和できるといえる。また、江東5区外への広域避難にまで誘導せずとも、江東5区内の比較的早く浸水状況が解消される場所へと住民を避難させるという施策も検討できるようになるだろう。

最後に、住民への働きかけとして長期浸水被害への理解を深める・周知するという方策

に触れる。高知県や江東 5 区ともに、救助活動の計画だけでなく、住民の自発的避難を助長するための事前計画として、洪水・氾濫リスクの説明をおこなっていくとしている。しかし、3 章でのアンケート結果からもわかるように、江東 5 区内に留まる意思の強い住民の意識を変えさせることは大きなハードルを抱えている。単なるリスクの説明・周知だけでは効果が期待できない可能性もあるが、そもそも何を説明するかを具体的に定める必要があるだろう。そのためには地域の住民の避難意識を詳細に把握することがまず重要となってくる。その際には、例えば救助に関する認識を確認するなど、多面的な要素にも注意が必要である。

3 章では域外に避難しない住民の意識として、救助活動に対する意識の薄さや期待の高さが問題になっていると示した。そのため、4 章のように水上での救助活動を待機する間の住民の避難生活の負担度合いをしっかりとイメージさせる必要があるだろう。そして、その負担の多寡は住民自身の意識・行動によって変えられるという事実にも注目すべきだろう。このように洪水・氾濫において、救助される住民と、救助する側という対立構造を崩し、住民自らがリスクに対処する主体であることを自覚してもらえるように周知していかなければいけない。現在の地域防災計画では、行政からの一方的なリスク提示にとどまっているように伺える。プラットフォームを用いれば、リスク内容を詳細に把握するとともに、住民自身が実施できる行動プランの策定も同時に行える。リスクの提示だけでなく、具体的にどのような判断・選択が住民に残されているのかも説明内容に加えるべきだろう。もちろん

Table.6-2 プラットフォームでの長期浸水対策の新知見の整理

	避難	救助
事前	<ul style="list-style-type: none"> ・水害リスクの周知 - 江, 高 => 個人レベルでの避難行動リスクの把握 (救助活動の限界への理解, 行動変容による解決の可能性) ・広域避難のための避難所整備 - 江 => 排水処理を考慮し, 浸水域内避難でも問題のない避難誘導の実現 => 一時的な垂直避難ビルへの保険設計 	<ul style="list-style-type: none"> ・ビルへのボート配備 - 江 ・浸水状況に合わせた救助順位の設定 - 江, 高 (江東デルタにおいては 具体的な計画が不明) ・救助時間の算出が 数式計算による - 江, 高 => より多くのシナリオに対する救助戦略の立案を支援, 検討コストの削減(対応ケースの網羅的かつ具体的に可視化) ・要救助者の限定とリストの作成 - 江, 高 => 浸水状況の推移を踏まえた 詳細かつ具体的な要救助者の発見
対応時	<ul style="list-style-type: none"> ・早期避難の誘導(広域避難) - 江 => 浸水状況の推移を踏まえた 詳細かつ具体的な避難誘導者の特定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ボート到達不可能地域へのヘリ輸送 - 高 => 浸水状況な深刻なエリアの特定
	<ul style="list-style-type: none"> ・住民の自主避難(潮の満ち引き) - 高 ・住民の自主避難(ボートでの) - 江 => ボートリソースの有効性の見直し(排水施設への輸送を重点化) 	

ん、排水処理を考慮し、避難誘導すべき住民を限定してアプローチすることも考えられる。

このようにプラットフォーム上で用意された各災害対応モデルの表現力の高さ、またはシミュレーションが動的な処理に対応していることにより、従来の防災計画の内容をより具体的に提示し評価できる仕組みとなったと考える。この具体化により計画内容の実用性・実現可能性も同時に分析することにもつながる。プラットフォームを通じた高度で詳細なプランニング支援により、従来よりも効果的な、あるいは別の方策を見出すことができたことが本プラットフォームの価値であるだろう。

6.4.3 プラットフォーム上の工夫

こうした目的意図を持つプラットフォームの中心技術であるシミュレーションでは、多様な要求に応えられるように出力内容を決定し、同時にユーザーからの操作性を確保しなければいけない。これらの要件をどのように対処しているかを、6.3 節で述べた機能要件に照らし合わせながら、以下に示す。

まず、シミュレーション間の連携については、第2章で説明したレイヤー連携構造により実現することで、各シミュレーションの可変性や代替性を損なわない仕組みにしている。また、各シミュレーションで使用する環境マップを共有することで、シミュレーション環境の作成手間を省くとともに、同地域を対象とするシミュレーション間の連続性を高める。さらに各活動モデルを移動部分と意思決定部分に分離して構築し、移動モデルについては基本的なプログラムを共有している。それにより、各シミュレーションから環境マップへ要求するデータ内容・形式を統一し、環境マップそのものの必要情報量を極力削減している(第6.3節②)。

つぎに環境マップについては、第3章の作成手順により、地理空間情報からシミュレーション環境へ変換する処理を自動化することが可能になっている(第6.3節①)。使用するデータは、基盤地図情報が提供している公開データであり、また全国的に整備されているため、各地でのシミュレーション向けの環境構築が行える仕組みができる。また、各シミュレーションで要求されているパラメーター等は、簡単なファイル作成により、容易な手続きでシミュレーションの計算条件を変更できる構造となっている。操作画面までは作成できていないが、ユーザーが直接シミュレーションのプログラムに触れることなく、自由にシナリオを変更できるよう配慮している(第6.3節⑤)。

シミュレーション間のデータ連携については、住民の避難後の状況を示したデータファイルを共有している。市街地が洪水により浸水した場合、浸水域内に残っている住民はそのままの状態を保ちながら救助が来るのを待つことになる。こうした実情を踏まえると、

住民の避難行動シミュレーションの結果である住民の最終的な(避難)位置情報が、その後
に接続されているボート救助シミュレーションでの初期住民配置データとなる。また、エ
ージェントシステムを導入したことや、建物を含む環境マップを共有していることで、住
民や避難建物を特定できる形で分析を続けることができる(第 6.3 節③)。また外部からの
入力によって、排水処理作業による浸水状況の変化も、環境マップの変化という形でシミ
ュレーションに反映されている。

個を識別できる仕組みとしたことで、各ステークホルダーが自身の判断の結末や、直接
関与しない災害対応フェーズでの振る舞いを追跡することができる。例えば救助活動中、
救助が遅れ避難生活が長引く住民の特徴として、避難時にどのような行動を選択したこと
が理由であるのかを、救助シミュレーション後の結果から時間を遡って分析できる(第 6.3
節⑤)。こうした自身の意思決定への反省を得られる仕組みとなっていることから、本研究
の目指す住民の避難意識を変容させる機会を創出できると期待できる。

6.5 今後の展望

本研究では、住民避難やボート救助活動、排水処理作業についてのモデルやそれらを
動かすためのシミュレーション環境を事前に用意した水害対策用プラットフォームを構
築した。洪水・氾濫対策のうち住民と救助という側面に限定されてはいるが、共通の問題意
識に対し多角的に議論を進められるよう支援するツールとなっただろう。デジタル防災の
実現のため、本プラットフォームをはじめとした、デジタルツインの枠組みに沿った災害対
応プラットフォームの展望を述べた。これは、災害対応に関わる全てのステークホルダー
が、災害対応について考え、アイデアを創出するための機会を提供するものである。そのた
めのツールとして、地理空間情報をベースとしたエージェントシミュレーションを開発し、
誰でも容易にアクセスできるよう工夫することが重要であるとした。特に、専門家いらず
のシミュレーション運用を実現するガバナンス構造を採用したことで、住民の避難意識変
容をより促進する防災教育ツールとしての効果を期待できる。

さて、水害対策用のプラットフォームについては、災害対応プラットフォーム全体の構想
の一部分を実現できていない(Fig.6-8)。今回、水害対応の種類として住民の避難行動やボ
ート救助活動のみを扱った。実際には、インフラ復旧や避難所運営、医療搬送等のさまざま
なフェーズもこの水害対応の課題に考慮すべきであろう。これらも統合し、ひとつのシステ
ム上で機能させる工夫が必要である。また、プラットフォームとして機能させるには、技術
的な要素がまだ不足している。特に3節で述べた機能要件を満たす別技術との連携やシミュ
レーション構造の改善を行うことも検討していきたい。

現状システムの構築やシミュレーションの運用を著者自身で行っているが、プラットフォームが持続的に駆動するよう、ユーザー視点でのソフトウェア開発の実現や実証実験へと発展させていきたい。

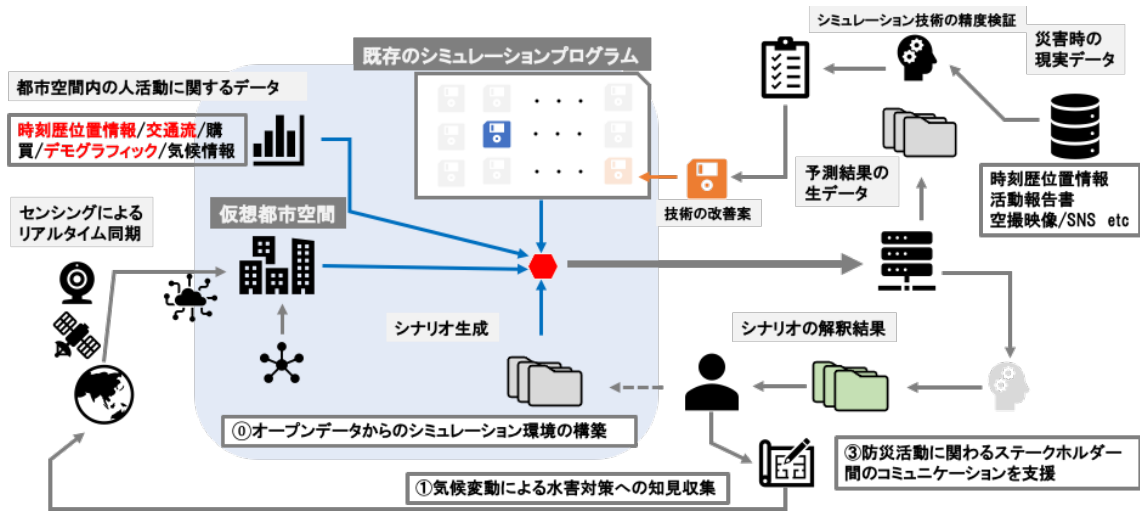


Fig.6-8 水害対応プラットフォームの実現範囲

—参考文献—

- [1]. 内閣府, “Society5.0”, Available online: https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0
- [2]. SIP4d, Available online: <https://www.sip4d.jp>
- [3]. 国土交通省, “Plateau”, Available online: <https://www.mlit.go.jp/plateau/>
- [4]. Fiware, Available online: <https://www.fiware.org>
- [5]. 高知市, “南海トラフ地震長期浸水エリアにおける避難対策について”, 平成 30 年,
Available online: <https://www.city.kochi.kochi.jp/uploaded/attachment/61796.pdf>
- [6]. 江東 5 区広域避難推進協議会, “江東 5 区大規模水害広域避難計画”, Available
online: https://www.city.edogawa.tokyo.jp/e007/bosaianzen/bosai/kojo/koto5_kyougikai.html

第7章

結論

本研究は大規模化が想定されている水害への災害対応上の課題について追究してきた。昨今の水害対策計画では、長期の浸水状態が発生した場合には救助活動だけの対処能力に限界があることを示唆するようになってきている。こうした問題背景に目を向け、その解決方法を模索するというのが本研究の起点であった。

災害対応上の課題については長い研究とその知見の蓄積されてきた。それらは避難や救助といった災害対応の各側面に特化したアプローチをとり、より具体的な問題だけを扱っている。小規模な災害や限定された災害対応場面ではこれまでのアプローチが十分に機能できるといえる。ただ大規模な災害に対してはさらに複雑なアプローチが要求されている。

そこで本研究が提案したアプローチは、肥大化する対策課題を複数の災害対応フェーズに渡って解決しようとするものである。本研究で扱った水害対策に沿えば、本来救助活動側の問題として取り上げられた救助リソース配分・救助効率化の課題を、救助される住民自身にも関わる問題であると捉え直した。それは避難行動と救助活動が時間的に連続しているために、救助活動前の避難行動を住民自らが意識的に改善していくことで事態を改善できるだろうという発想であった。また、救助活動としても住民の避難意識や避難行動が予測できれば適切な戦略を立案し実施することができるだろう。

そこで、本研究ではシミュレーション技術をプラットフォームという形で普及することを提案した。災害対応に関する諸シミュレーション技術や自然災害モデルをひとつのシステム上で統括的に管理し、誰もが自由に分析や予測を行え、明日の防災対策を共に検討できる場を用意することを目指した。住民の避難計画を見直すという目的であれば、避難時だけの判断ではなく救助活動の展開にまで意識を向けて避難行動を省みる機会を提供できる。あるいは、救助活動の戦略強化という目的であれば、他の災害対応の役割を俯瞰し、必要であれば救助活動の戦略にその効果を導入するといった一体的な対策を実現する。災害対応が複雑化するなか、他の活動だけでなく、自身が担当する活動でさえ”正しく”行えているのか判断することも難しくなっている。そこで災害対応に関わる各ステークホルダーが独自に、そして自発的に、共同で災害対応の課題に対抗できるようサポートするシステムを構築することを目指した。そこには、ステークホルダー自身が、自らの判断に基づいて行動を変容するためのガバナンス構造のコミュニケーションを形成する意図もあっ

た.

以降では、本研究での研究手順や成果について、改めて整理していくとする。

第3章ではまず長期浸水のリスクを抱える地域、特にあえて避難しなくとも良い場所に居住している都市部の住民に対し、浸水発生時における救助活動への意識を把握することにした。結果として、回答者の大多数が救助活動を待つ自身の姿にまで意識が届いておらず、浸水域外に避難するという回答もごくわずかであった。この結果により長期的な浸水が起きた場合には、膨大な要救助住民が発生すると見込まれ、救助活動上の諸課題が依然として存在することを調査ベースで裏付けるものであった。

しかし昨今の救助活動の課題は、救助活動だけでなく住民自身にも無視できない状況となっているはずである。例えば、2週間以上もの期間を浸水域内で過ごすことになれば、住民自身の健康や生命にも影響を及ぼすだろう。こうした背景を考慮すれば、住民自身も長期的な視点に立って避難行動を判断すべきだろう。しかし、アンケートの結果を踏まえれば、現状のところ救助活動の実施にまで避難意識が行き届いていない。

そこでこのアンケートの結果を起点に、プラットフォーム上での検討内容を設定することにした。まず、住民の視点からは、避難のための避難ではなく、救助活動やその後の災害対応下での住民自身の負担を考慮し、長期的な視点での避難行動の判断や計画を策定する必要があるだろう。他方、救助の視点ではほとんどの住民が浸水域外に避難していないことを前提とした救助計画を立てる必要があるだろう。第4,5章では、プラットフォーム上の諸モデルを組み合わせたシミュレーションの実施をし、住民・救助の両観点からの課題解決を図った。

第4章では、まず浸水域におけるボート救助活動そのものの特性を把握することとした。浸水域での救助活動に関する研究事例が少ないことや住民側の視点での課題がまだ見えていない。そこで、救助を待つ住民への負担度合いや住民同士の影響関係といった住民視点での救助活動の具体的な課題に焦点をあてた。そして住民の避難意識に考慮すべきリスクを発見し、なぜ避難しなければいけないのか、なぜ解決しなければいけないのかという避難意識の改善意図の形成を図った。次の段階として、具体的な避難計画や長期的な視点での描く避難行動の是非を評価することとした。そこで、救助活動のフェーズから時間を遡り、住民の避難行動に着目し、住民の避難行動とその後の救助活動の連続性に着目した。

これらの結果として、救助活動を待つ間の住民の避難生活の負担は、救助が始まる前の住民の避難行動の選択に影響を受けるという関係性が見出された。避難の必要性に対し実際に地域内の住民の避難行動を変えることで、結果として住民の負担を減らすことになるという避難行動変容の有効性を示した。しかし、短期的な目線で実行する避難行動と、長期

的な視点で考えなければいけない救助活動を踏まえた避難行動では、住民に対して異なるコストとベネフィット構造を比較させるという難しさがあつた。目の前の安全確保に対し、時間をかけることやあえて危ない状況を屋外で避難するという負担を住民に要請する後者の避難行動へと住民の意識を向けさせることへの課題が生まれた。

第5章では、依然として救助活動のリソースを圧迫している現状に対し、今度は救助活動側の努力によって住民への避難生活の負担や要請を緩和できないか検討をはじめた。そこでは、従来インフラ復興や復旧で行われる排水処理作業を救助戦略のひとつとして取り入れることにした。排水処理による浸水範囲の縮小効果をモデリングし、それを踏まえた新たな救助活動モデルを提案した。浸水状況が徐々に改善されることを見据えた新たな救助戦略では、従来の救助活動よりもより多くの住民を救助できることを示した。同時に、それでも一定期間内に救助できない住民の存在があることを受け、より限定した地域の住民への働きかけの必要性が判明した。

本研究の最終的な成果としては、水害の救助活動を取り巻く災害対応を包括した小さなプラットフォームを構築したことであろう。そこでは、非専門家でもシミュレーション技術をはじめとした高度なデジタル技術を手軽に利用でき、自発的に防災対策を検討できるような配慮をしている。今後の巨大災害の到来にむけ、デジタル技術がより身近に感じられるようなプラットフォームの必要性がより高まっているといえる。いつ発生するか予知できない巨大災害に対し常日頃から”避難行動を実施する”ということは不可能に近い。あるいは、排水処理の効果を考慮するとしても、どの程度の効果があり、それを計画にどのように活かすことができるのかを日常から具体的に検討することは難しい。当初の問題意識を解決するための最後のピースは、この知見をいかに社会に提供し、住民をはじめとしたステークホルダーが持続的に取り組めるものにするかであった。こうした非日常現象での体験に対しては、シミュレーション技術をはじめとしたデジタル技術によって補うことが期待できる。第6章では、本プラットフォームの実現内容や普及する際の検討項目について論じ、防災プラットフォームの今後の展望を述べた。

本研究では災害対応の中でも、洪水・氾濫の対策のうちの特に住民の避難行動と救助活動という限定された側面だけに着目した。もちろん他の災害や、水害対策においてもさらに多くの異なる災害対応の内容についても今後プラットフォームに加えていく必要があるだろう。年々激甚化していく巨大災害への対抗策を関係者全員が同じ目線で考え、肩を並べて取り組んでいけるよう、日頃からの支援できるシステムの実現を目指していきたい。

謝辞

本学位研究の実施に当たり、大変多くの方にご指導、ご支援、ご協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

畑山満則教授(京都大学防災研究所巨大災害研究センター)には、博士後期過程 3 年間にわたりご指導いただきました。他研究科からの本研究室への進学を快く迎えていただけたことをはじめ、プラットフォーム学に即した指導方針のもと、常に挑戦する気持ちを大事にしてくださり、さまざまな機会を提供していただきました。災害対応に関する豊富なフィールド知識に基づき、本研究の価値や方向性を一緒に議論するなかで、情報技術を用いた実践的な研究の意義について多く学びました。廣井慧准教授(京都大学防災研究所巨大災害研究センター)には、ゼミや個別ゼミのなかで本研究の価値や今後の展望について、情報技術への広い見地から議論する機会をいただきました。申請書の作成やプレゼンの仕方を直にご指導いただけただけでなく、研究の意義や研究の楽しみを見出す数々のアドバイスをいただき、三年間の本研究への取り組みを精神的にサポートしてくださいました。

矢守克也教授(京都大学防災研究所巨大災害研究センター)には、博士後期過程における研究アドバイザーを引き受けていただきました。また、研究室へのゼミにも参加させていただき、文学的見地からの議論の機会を多くいただき、本研究の学術的意味や価値、問題を発見するきっかけを与えていただきました。伊藤孝之教授(京都大学大学院社会情報学コース)にも、博士後期過程における研究アドバイザーを引き受けていただきました。マルチエージェントを用いた研究デザインやエージェント同士のコミュニケーション内容について、技術的な見地での議論や素朴な疑問へも真摯にご対応いただきました。原田博司(京都大学大学院通信情報システムコース/プラットフォーム学卓越大学院)には、本学が採択されました卓越大学院プラットフォーム学のなかで技術や産学連携に関し学べ、将来プラットフォーム人材になるための機会を多く提供してくださいました。普段の研究をより俯瞰的な視点で捉えことの重要性や、月の連続セミナーでは社会の現状について多角的に議論することができました。本プログラムを統括的に運営される立場でありながらも、学生の悩みや研究内容に真摯に向き合ってくださいました。長い間、辛抱強く、そして厳しく温かくご指導くださいました上記の先生方に、心より感謝いたします。

佐山敬洋教授(京都大学防災研究所社会防災研究部門)には、洪水・氾濫シミュレーションの利用において、ご自身の研究との関連性からアドバイスをいただきました。また、具体的なソフトウェアについて、山田真史助教(京都大学防災研究所水資源環境研究センター)とのやりとりの仲介もしていただきました。山田真史助教には、洪水・氾濫シミュレーショ

ンの具体的な活用や利用上の課題の対処における疑問に対し密な連絡やオンライン会議にも真摯にご対応いただきました。お二方のご協力がなければ、本研究を進めることもできませんでした。突然の申し出にも、懇切丁寧にご対応いただきましたことに心より感謝いたします。

古賀玲衣奈様(株式会社クロス・マーケティング)、向笠真里奈様(株式会社クロス・マーケティング)には、第5章での避難意識のアンケート作成において多大なご協力をいただきました。アンケートの設計やフローについて、認識の矛盾がないように丁寧に要望を聞いてくださいました。また、複雑なアンケート処理でも真摯に対応し実現してくださいました。質のよいアンケート調査を実施できたのはこの二方のご協力あってのことでした。この場を借りて感謝申し上げます。

本研究の一部は、3年間の京都大学 科学技術イノベーション創出フェローシップ（情報・AI分野）、令和5年度のJSPS 科研費(JP23H03691)、および卓越大学院プラットフォーム学による支援によるものです。不自由なく研究をおこなうための経済的支援をいただけたことについて感謝いたします。

巨大災害研究センターの清水豊子さん、プラットフォーム学卓越大学院事務部塚上公昭さんをはじめとした各事務職員の方々には、研究活動をさまざまな面で支えていただきました。心より感謝申し上げます。

最後に、別研究科での博士後期過程進学へと背中を押してくれ、研究活動を温かく見守ってくれた家族に感謝の意を表します。

付録

	A	B	C	D	E
A	1.000	0.552	0.617	0.619	0.474
B		1.000	0.531	0.516	0.469
C			1.000	0.652	0.418
D				1.000	0.519
E					1.000

1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0

Cramel's V

Fig. A-1. 回答者の災害情報に対する認知傾向の関連表

図中の記号は Table.A-1 を参照

Table. A-1. 回答者の質問回答パターンの分析結果

回答数	質問項目				
	A	B	C	D	E
914	✓	✓	✓	✓	✓
362	×	×	×	×	×
202	×	×	×	×	✓
157	✓	×	✓	✓	✓
120	✓	✓	×	✓	✓
78	×	✓	×	×	✓
76	✓	×	×	×	✓
65	✓	✓	×	×	✓
59	✓	✓	✓	×	✓
55	×	×	×	✓	✓

✓: 知っている
 ×: 知らなかった

質問項目

A	: 「大雨特別警報」の意味について
B	: 「洪水危険度分布図」について
C	: 避難に関する情報の危険度の違いについて
D	: 「警戒レベル」の内容・違いについて
E	: ハザードマップをみたことがあるか

Table. A-2. 江東デルタ地帯内でのハザードマップの更新歴

Event No.	Event Details
E1	ハザードマップの作成義務
E2	想定最大規模降雨への対応(荒川も)
E3	江戸川区のハザードマップの更新
E4	荒川浸水のハザードマップの更新
E5	水防法の改正(中小河川も対象に)
E6	ハザードマップの避難情報の表記改訂

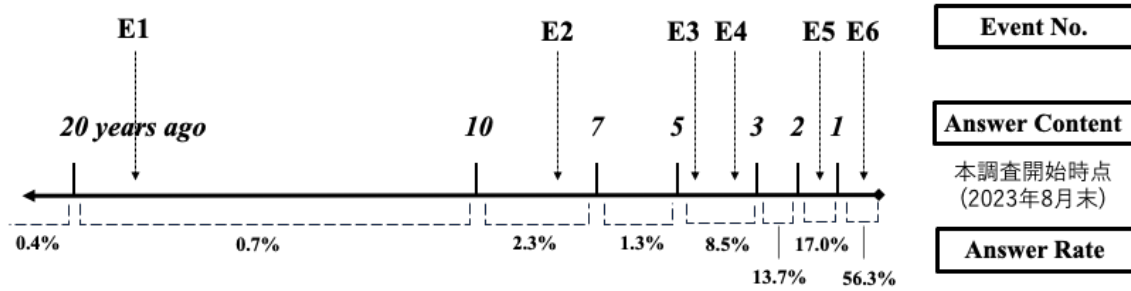


Fig. A-2. 回答者のハザードマップ閲覧時期と各イベントの対応(Table.A-2)

Table. A-3. 回答者の居住パターンと被災リスクの認識の関連性

居住パターン	洪水被災の可能性の現状認識				
	0% (n = 163)	1-30% (n=960)	31-69% (n=899)	70-99% (n=233)	100% (n=145)
戸建て・マンション・アパート (1,2階),n = 768	35	233	333	106	61
マンション・アパート (3階以上),n= 1588	123	714	553	121	77
その他,n= 44	5	13	13	6	7

Cramel V
p-value 0.133
 < 0.01

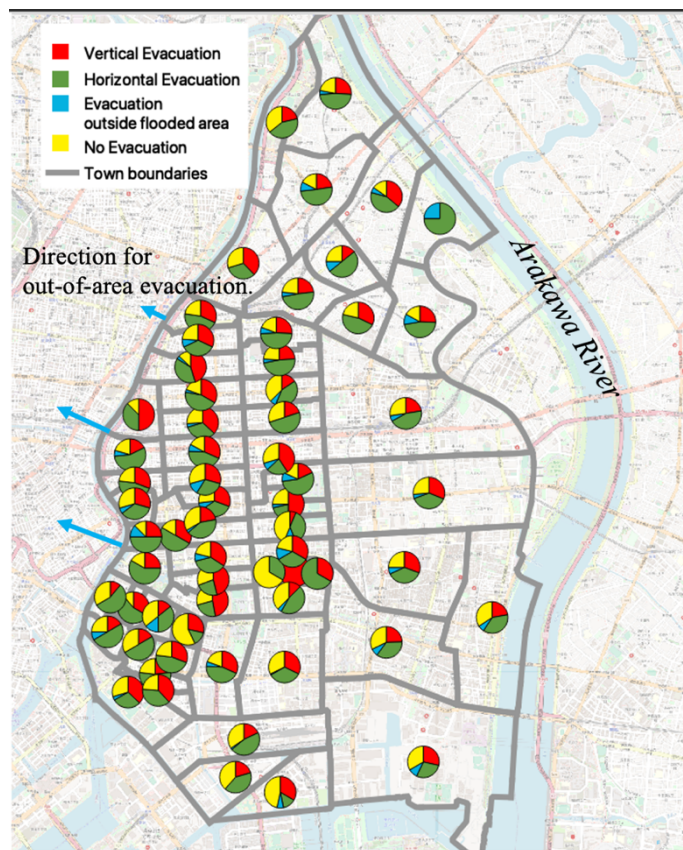


Fig. A-3. 回答者の居住位置と危機意識の関係性

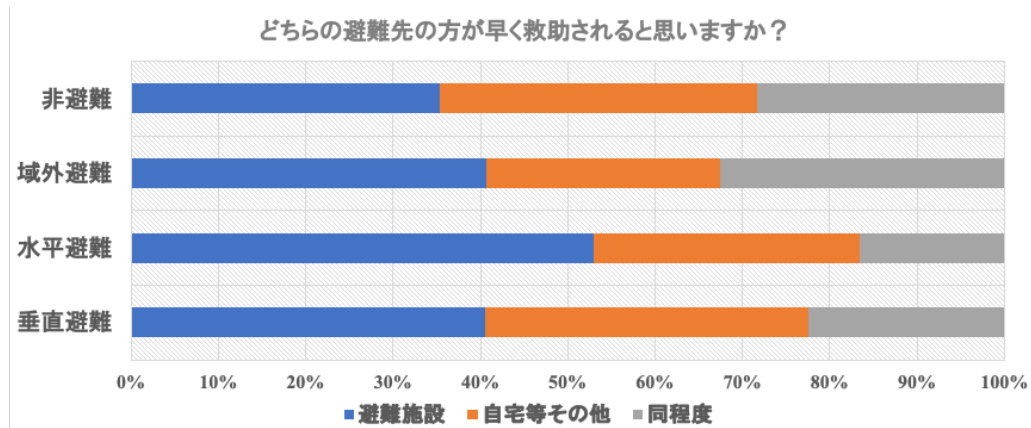


Fig. A-4 回答者の救助優先度の高さに対する認識

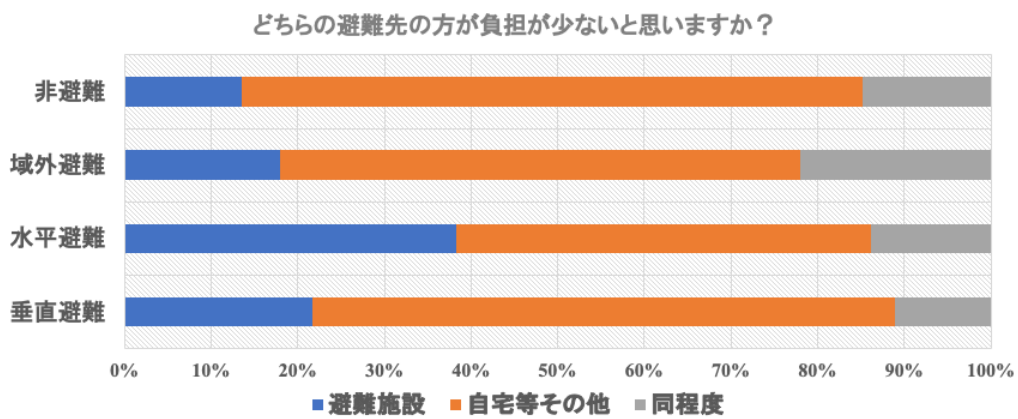


Fig. A-5 回答者の避難生活の負担度合いに対する認識

Table. A-4. 救助手順に対する回答者自身の意見および他の回答者の判断予測

回答者の判断	他の回答者の判断予測					
	①	②	③	④	⑤	⑥
①	140	59	23	3	34	36
②	14	57	24	5	10	7
③	8	39	118	7	20	25
④	6	2	6	20	11	4
⑤	16	11	12	2	162	74
Total	184	168	183	37	237	110

Cramel'V: 0.47
p-value: < 0.01

回答者自身の判断

- ① 自分の家族を先に
- ② 自分の家族のうち高齢者と子供を先にするが、それ以外は気にしない
- ③ 相手も含め取り敢えず高齢者や子供を先にするが、それ以外は気にしない
- ④ 他の人たちに譲る
- ⑤ 救助部隊の選択に委ねる

他の回答者の判断予測

- ① その人の家族を先に
- ② その人の家族のうち高齢者と子供を先にするが、それ以外は気にしない
- ③ 他の人も含め取り敢えず高齢者や子供を先にするが、それ以外は気にしない
- ④ 他の人たちに譲る
- ⑤ 救助部隊の選択に委ねる
- ⑥ 分からない

Table. A-5. 情報提示後の回答者の避難判断の変化

避難判断	After				
	垂直避難	水平避難	域外避難	非避難	合計
Before 垂直避難 (n=659)	436	167	26	30	659
水平避難 (n=955)	123	744	48	40	955
域外避難 (n=123)	19	41	55	8	123
非避難 (n=663)	78	60	25	500	663
合計	656	1012	154	578	2400
差分	-3	57	31	-85	

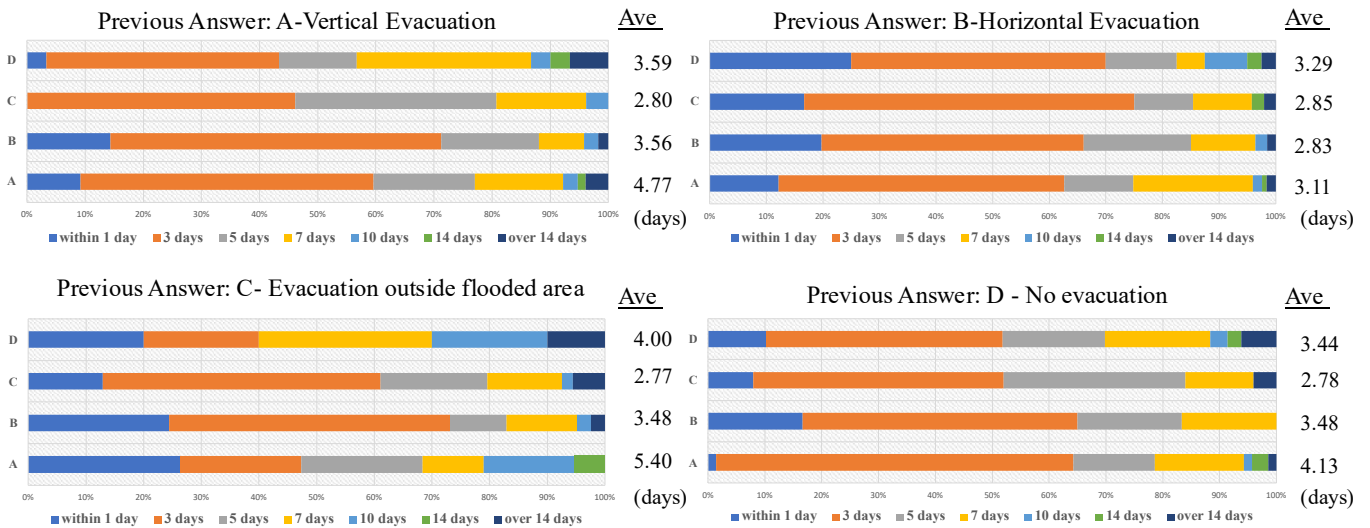


Fig. A-6. 回答者の避難判断変更後の救助時間への期待度

Table. A-6. 2回目の避難判断への数量化Ⅱ類の適用と1回目からの変化

説明変数	カテゴリー	レンジ	偏相関係数		
			2回目		1回目
居住場所 (SA)	戸建て・マンション・アパート(1,2階) マンション・アパート (3階以上) その他	0.613	0.119	>	0.115
年代 (SA)	20代 30代 40代 50代 60代 70代	0.522	0.092	>	0.082
想定浸水区域内 (SA)	浸水想定区域(浸水深:3m以上)にある 浸水想定区域(浸水深:0.5~3m)にある 浸水想定区域(浸水深:0.5m以下)にある 浸水想定区域ではない 対象河川が近くに無く、浸水想定区域が設定されていない わからない	0.396	0.055	<	0.069
風水害の被害を受ける危険性 (SA)	ありえない(0%)と考えている 可能性は低い(1~30%)と考えている 可能性はある程度ある(31~69%)と考えている 可能性は高い(70~99%)と考えている 必ず被害を受ける(100%)と考えている	0.657	0.087	>	0.085
避難行動の判断材料 (RA)	避難先までの距離 自宅 避難先と河川との近さ 避難経路の安全性・危険性 避難先での避難生活の負担 救助を含め避難生活からの解放までの見込み時間 洪水発生までの猶予時間 家族や知り合いの存在 浸水範囲の見込み その他	1.387	0.301	<	0.308
避難生活で不安なこと (RA)	トイレ・風呂といった衛生面の不安 飲食料の供給 電気などのインフラの存在 窮屈な生活 孤独を感じる 共同生活でのコミュニケーション 特になし その他	2.507	0.121	>	0.099
救助方針への要望 (RA)	避難施設など沢山の人が集合している場所を優先する 高齢者や子供などを優先する 浸水域の外縁に近い場所から順に 浸水域の中心部に近い場所から順に 救助部隊が発見した住民から手当たり次第に 部隊の方針に任せる 自宅やマンションなど、集団から孤立している避難者を優先	0.710	0.107	<	0.143
より早い救助が見込める場所は？ (SA)	避難施設 それ以外の建物(自宅等) 同じ程度の時間	0.363	0.086	<	0.093
避難生活の負担がより少ないのは？ (SA)	避難施設 それ以外の建物(自宅等) 同じ程度の時間	0.550	0.120	>	0.103
救助されるまで耐えられる期間 (SA)	1日以内 3日以内 5日以内 7日以内 10日以内 14日以内 14日以上	0.634	0.098	>	0.073
救助が遅れる可能性 (SA)	知っている 知らない	0.088	0.018	<	0.024
救助活動の限界 (SA)	知っている 知らない	0.001	0.000	<	0.019
救助活動中救助できない可能性(SA)	知っている 知らない	0.120	0.027	<	0.034
Eta		0.296			