マルチエージェントシミュレーションを用いた防災地域まちづくりの計画手法
-防災ロバストコンパクトシティの構築 その２ 函館市・釧路市を対象として-

コンパクトシティ　まちづくり
立地適正化計画　津波避難シミュレーション
津波　マルチエージェントシミュレーション

正会員　○松下 鯉太郎 *　　同　石井 旭 ****
同　瀬戸口 剛 **　　同　杉本 匠 *****
同　中嶋 唯貴 ***

1. 研究の背景と目的

日本の地方都市おいては、既成市街地や立地適正化計画（以下、立適）における誘導区域が災害リスクの高い地区に形成されている場合がある。既往研究では災害の中でも特に大きな被害が予想される津波に着目し、市域全体を対象として、避難困難な地域の抽出や被害想定を改善するための提案が行われている[1)]。対して、町・地区レベルの狭域では、避難計画や防災意識に関する研究・施策が多く、都市計画的視点を持った研究は極めて少ない。

本研究では、マルチエージェントシミュレーション(以下、MAS)を用いて、災害発生直後の経時的な避難状況と地域特性を合わせて分析することで、狭域における津波災害に対する都市計画的対策を検討し、それらの効果を明らかとすることを目的とする。

2. 方法

①対象都市において津波浸水想定と避難計画の現状を把握し、GIS津波避難シミュレーションを用いて、津波避難が困難な地域を明らかにする。②①の津波避難困難地域において、MASを用いた現状の避難行動の分析を行う。③津波災害への都市計画的対策を検討しMASで再現してその効果を検証する。④以上により、狭域における津波災害に対する都市計画的対策の提案を行う。

3. GISによる津波避難シミュレーションの概要

日本海溝･千島海溝沿いの巨大地震モデル[2)]の最大クラスの津波浸水想定に基づき、函館市と釧路市を対象としてGISによる津波避難シミュレーションを行った(図1,2)。

水平避難シミュレーション	【最大避難可能距離】 ＝（歩行速度）×(最短津波到達時間 - 避難開始までの時間) ＝（0.5m/s)×(26 分 -10 分)≒450m (函館市ヒアリング 2022/6/23 に準拠)
垂直避難シミュレーション（到達の可否）	【最大避難可能距離】同上 【津波避難ビル・収容人数】浸水域内の函館市指定津波避難ビル 78 箇所 (函館市ヒアリング 2022/8/30 に準拠)
垂直避難シミュレーション（収容の可否）	【津波避難ビル収容人数】各避難ビルの想定収容人数 (函館市ヒアリング 2022/8/30 に準拠)

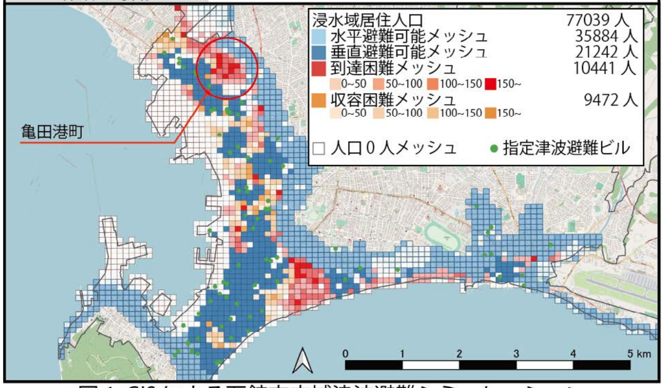

図 1 GIS による函館市広域津波避難シミュレーション

水平避難シミュレーション	【最大避難可能距離】 ＝（歩行速度）×(地点ごと津波到達時間 - 避難開始までの時間) ≦ 1000m（海側への移動は上限 250m）（釧路市ヒアリング 2023/8/25 に準拠）
垂直避難シミュレーション（到達の可否）	【最大避難可能距離】同上 【津波避難ビル・収容人数】浸水域の釧路市指定津波避難ビル 131 箇所、新設予定避難ビル 1 箇所（釧路市発表 2023/1/16、ヒアリング 2023/8/25 に準拠）
垂直避難シミュレーション（収容の可否）	【津波避難ビル収容人数】各避難ビルの想定収容人数 (釧路市発表 2023/1/16、ヒアリング 2023/8/25 に準拠)

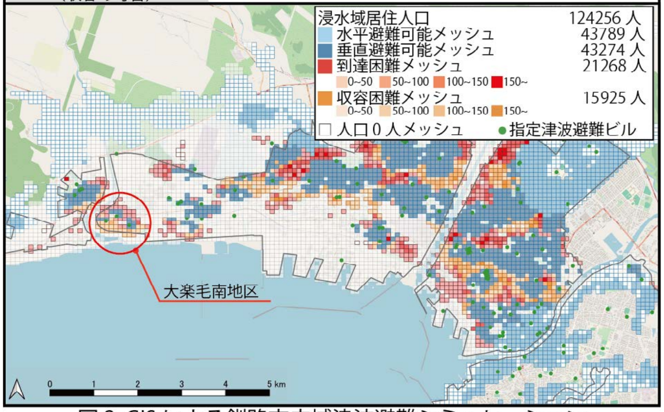

図 2 GIS による釧路市広域津波避難シミュレーション

津波避難困難地域と居住誘導区域[3)4)]が重なった函館市亀田港町、釧路市大楽毛南地区を本研究の対象に選定する。これらの地域は、いずれも市街中心部から離れた中低層な居住地域である。

4. MASの概要

対象範囲の人口を居住建物の床面積で按分し、建物から避難する(発生させる)人エージェントの数を設定する[注1)]。公共道路を通り津波浸水域外もしくは津波避難ビルに避難が可能かを検証する。避難準備時間は10~15分[5)6)]、避難速度は子供(0-14歳)と高齢者(65歳以上)と大人(15-64歳)でそれぞれ0.5m/s、1.0m/s（誤差±10%）と設定した[7)]。シミュレーションフローは図9に示す通りである。

5. 函館市亀田港町の津波避難現状分析

亀田港町では、対象範囲内に函館市指定の津波避難ビルがないため、水平避難を条件としてMASを行った。その結果、最大の避難時間は約55分となり(図4a)、津波到達前に水平避難が可能であるが、多くの人が対象範囲を通る線路を迂回して避難していることが分かる(図5a)。以上から、避難時間短縮の余地があると考えられる。

6. 亀田港町における津波避難の都市計画的対策の検討

対象の津波避難困難地域は、2040年時点での人口密度が40人/haと推計され[8)]、居住誘導区域に指定されていて、まちづくり方針でも現在の中密度・中低層の一般住宅地を維持する方針であるため[9)]、これを前提として対策を検討する。①まず対象範囲には、津波避難ビルの選出基準を満

Planning Methods for Disaster Prevention Cities using Multi-Agent Simulation
-Planning to Robust Compact Cities for Preventing Disasters Vol.2, Case Studies in Hakodate and Kushiro, Hokkaido -
MATSUSHITA Koitaro

たす既存建築物が３棟あり、これを追加指定津波避難ビルとする対策が考えられる。次に、現状の避難経路の迂回を解消する手段として、②未着手の都市計画道路[10]の実現と、③線路や空地を横断する避難路の整備が考えられる。④①と③を組み合わせた対策が考えられる。以上４つの対策についてMASを用いた検証の結果を以下に示す。

① 追加指定津波避難ビルの収容人数が十分でないため、津波避難ビルに向かうものの収容困難となり、改めて水平避難を行うことによって、ほとんどの人で避難時間が増大した（図4e, 5b）。

② 都市計画道路により迂回が解消され、子供・高齢者において、避難時間の中央値が約3分改善した(図4b, 5c)。また、跨線橋頂部を収容人数無制限の避難先とする条件では、避難距離がより短縮され子供・高齢者において、約10分改善した(図4c)。

③ 避難路を4箇所追加すると、②と同様に線路や空地による迂回が解消され、子供・高齢者において平均避難時間が約6分短縮された（図4d, 5d）

④ ①と③を組み合わせた場合も①と同様に全員避難完了までの時間が増大することが分かる(図4f)。そこで、図3に示すように水平避難を優先して選択するように設定すると、収容困難が生じにくくなり結果として避難時間が短縮された(図4g、水平避難の優先7倍)。

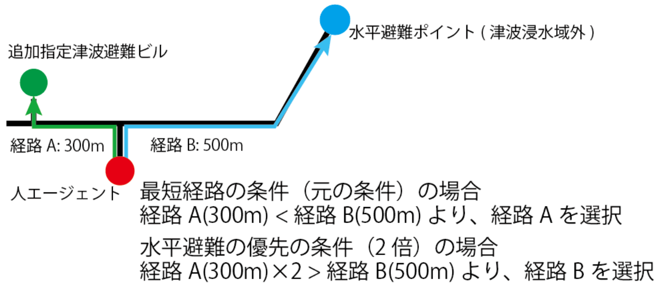

図 3　水平避難を優先する避難先の選択の模式図

以上から亀田港町では、適切な避難経路の確保と、水平避難を優先する避難先の選択を行うことで避難状況が改善するとわかり、これらを実現するため以下の３つの対策を提案する。

・ 線路脇の柵や壁の一部に蹴破り式の柵に変えることや非常用用の扉を設置すること。

・ 都市計画道路（跨線橋）を実施する際は、避難経路としての利用の他、十分な高さとし頂部に防災倉庫を設けるなどして、跨線橋上への避難を可能とすること。

・ 水平避難を基本とした避難先・避難経路の確認、避難訓練を行うこと。

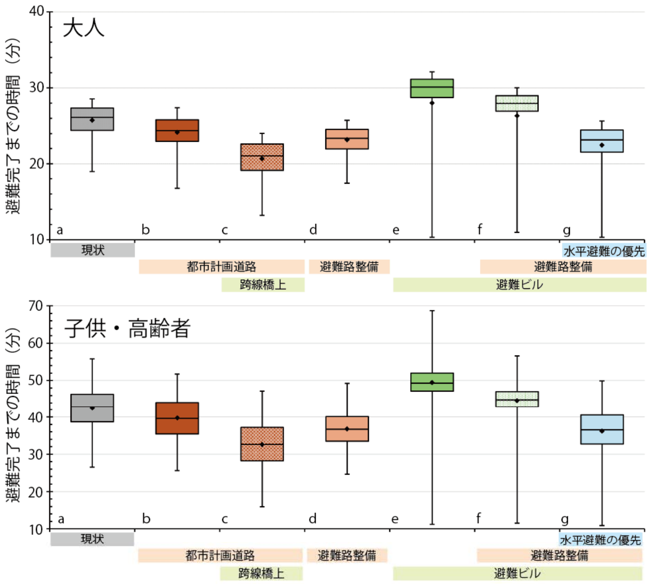

図４　亀田港町 各対策ごと避難完了時間

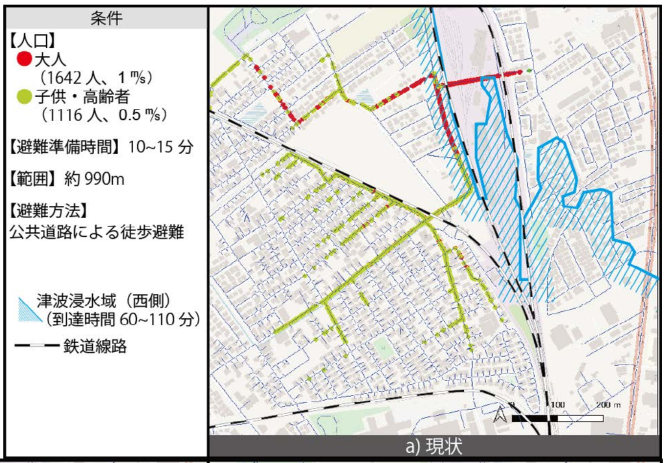

図 5　函館市亀田港町の MAS 結果（避難時間[注2]20 分時点の比較）

7. 釧路市大楽毛南地区の津波避難現状分析

大楽毛南地区では、最短津波到達時間が約24分と短く水平避難が難しいため指定津波避難ビルへの垂直避難を条件としてMASを行った。その結果、子供・高齢者のうち約27%しか避難完了ができないと分かる(図6a, 7a)。

また、対象範囲の歩道橋を避難路とした場合、大人が先に避難ビルに到達することにより、子供・高齢者に収容困難が生じると分かった(図6b)。

8. 大楽毛南地区津波避難の都市計画的対策の検討

大楽毛地区は釧路市立地適正化計画で生活拠点とされ、地区の維持を前提に対策が検討されている[4]。ここでは、①まず現在計画されている津波避難ビル（収容人数900人以上）[11]の効果を検証する。②次に亀田港町と同様に、線路を横断する避難路の整備の効果を検証する。①と②を合わせた際の適切な避難先の選択の効果として、③新設津波避難ビルへの避難を優先する場合、④大人は距離にかかわらず新設津波避難ビルに避難する場合を検証する。以上４つの対策の検証結果は以下の通りである。

① 新設津波避難ビルの収容人数は十分であり、津波避難ビルを追加したいずれの場合においても、ほぼすべての大人が避難完了することができ、子供・高齢者においても現状に比べ避難完了率が22.8%改善されていることが分かる(図6d, 7b)。

② 地区中心部に線路を横断する避難路を２箇所追加した場合、大人では軽微な改善が見られたが、大人が先に避難ビルに到達することにより、子供・高齢者に収容困難が生じ避難完了率が下がる(図6c,図7c)。

③ 亀田港町において水平避難を優先して選択させたのと同様の方法を用いて、新設避難ビルへの避難を優先させることで避難状況が改善され、子供・高齢者の避難完了率は、避難ビル新設と線路を横断する避難路の追加を行った場合（図6e）と比べ約10%増加することが分かる（図6f、新設津波避難ビルの優先7倍)。

④ 大人は距離にかかわらず新設津波避難ビルを目指し、子供・高齢者は最寄りの避難先に避難するものと設定すると、子供・高齢者の避難完了率は、8割程度に大きく改善された(図6g,7d)。

以上から、大楽毛南地区では津波到達が早いため、津波避難ビルの有効性が示された。また、避難先を再設定し避難し直すことによる避難時間の増大が避難完了率に直

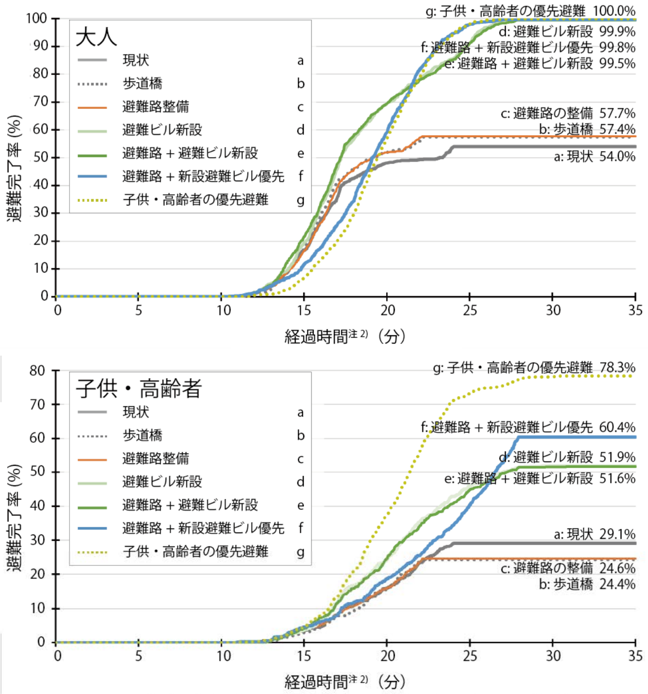

図６ 大楽毛南地区 各対策ごと避難完了率時間推移

図７ 釧路市大楽毛南地区の MAS 結果（避難時間[注2)] 20 分時点の比較）

結することから避難計画も重要であることが示された。対策としては以下の２つが提案できる。

- 避難経路を覚えるといった観点から、新設津波避難ビルを日常的に利用する施設とすること
- 特に避難が難しい、時間がかかる人の逃げ遅れを防ぐため、誰がどこに避難するかの詳細まで含めた避難計画を立てること

本研究で効果を検証した津波避難ビルは、公民館機能や老人福祉センターを含めた４階建ての複合施設が計画されており、日常的に利用する施設であることは本研究における対策の提案とも合致する。

9. 結論

本研究では、町・地区レベルの狭域に対するMASを用いた分析によって、災害発生直後の経時的な避難状況を明確にし、津波避難に対する都市計画的対策を検討し効果を示した。本研究で明らかとなった津波災害リスクのある地域での都市計画的対策の特徴を以下に述べる。

1) 亀田港町のように、津波到達まで比較的余裕がある地域では、都市基盤自体の整備によって、避難経路を整備することが有効である。
2) 特に大楽毛南地区のように津波到達が早い地域では、避難先を作ることが重要であると同時に、避難先、避難経路の選択が重要になることから、それらの検討に、経時的で個別具体の検討が可能なMASが有効である。
3) 市域全体でのGISによる津波避難シミュレーションを用いた津波避難困難地域の把握、津波避難困難地域でのMASを用いた詳細な分析といった段階的な手順で、効果的に計画を行うことができる。

以上から、避難行動を経時的・個別に分析し、防災と都市計画の両面から考えた都市計画的対策、避難計画を検討することが地方都市には重要である。また、今後、地域の住民と関係し、より詳細な対策を検討することを計画しており、その先駆けとして亀田港町などを対象とした逃げ地図ワークショップを行った。

図８ ワークショップ注3) で作成した逃げ地図（亀田港町）

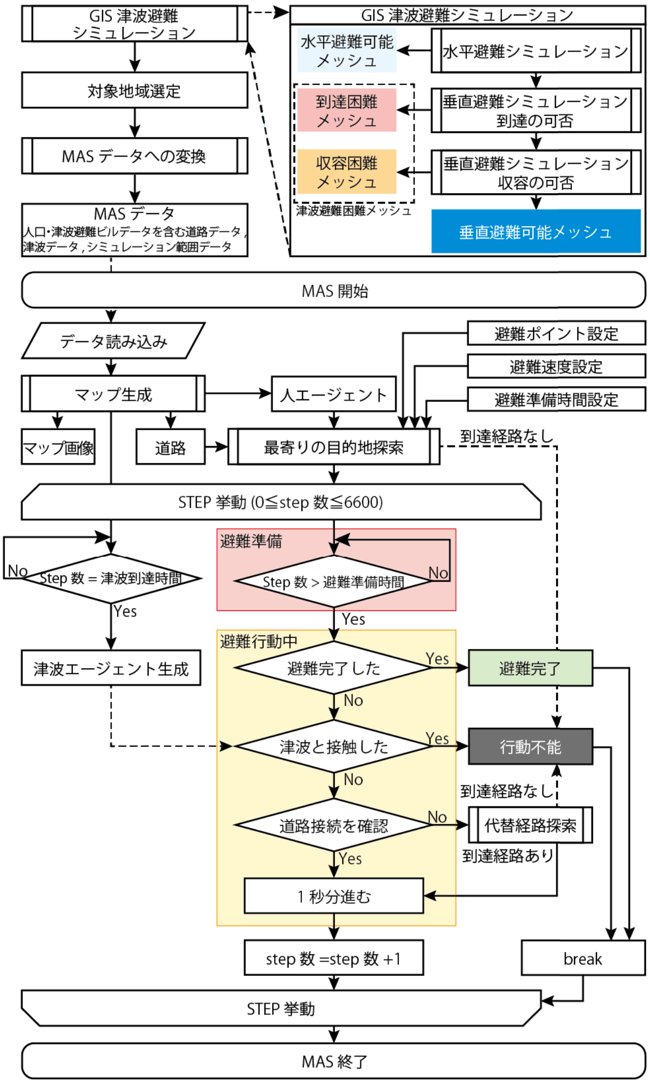

図９ 全体 シミュレーションフロー

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21K18174「人口減少都市において防災効果を高めるロバストコンパクトシティの構築」の助成を受けたものです。

【参考文献】1)川井智大,他5名:津波被害を低減するコンパクトシティの計画手法 -防災ロバストコンパクトシティの構築 その1-,日本建築学会年次大会,p.67-104,2023　2) 内閣府防災担当:日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震モデルの検討について,2020　3)函館市:函館市立地適正化計画,2018 4)釧路市:立地適正化計画,2019　5)函館市:函館市津波避難計画,2022　6)釧路市:釧路市津波避難計画,2021　7)総務省消防庁: 市町村における津波避難計画策定指針,2012　8)国土交通省:1000mメッシュ別将来推計人口(平成27年国勢調査),2018、株式会社ゼンリンマーケティングソリューションズ:平成27年国勢調査100mメッシュ推計データ,2018　9)函館市:函館市都市計画マスタープラン,2011　10)函館市都市建設部都市計画課:函館市の都市計画道路,2023　11)釧路市:発表,2023

【注釈】注1)北海道建設部まちづくり局都市計画課:都市計画基盤調査(第７回),2018、参考文献8)から算出 注2)地震の揺れが収まった時間から起算（避難準備時間+移動時間） 注3)「逃げ地図」WS in 函館市役所,2024/01/31

*	北海道大学大学院工学院 修士課程	Master Course, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ.
**	北海道大学 理事・副学長/大学院工学研究院 教授 博士（工学）	Executive Vice President, Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng
***	北海道大学大学院工学研究院 准教授 博士（工学）	Assoc. Prof., Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng
****	北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所 博士（工学）	Northern Regional Building Research Institute, Dr.Eng.
*****	北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所 工修	Northern Regional Building Research Institute, M.Eng.