

3次元人流シミュレーションによる 広域避難計画の評価に関する試み

岩切 宗利, 宮崎 裕輔, 竹之上 典昭, 加藤 健

適切な避難計画は、災害発生時の人的被害抑制に有効であるものの、その避難計画の有効性を検証するための大規模な実働実験は困難である。本研究では、避難計画の最適化を目的とし、3次元避難シミュレーションを利用した実証実験法を検証した。本手法を実現するため、国土地理院が提供している地理情報を用いた3次元シミュレーションを作成し、神奈川県横須賀市走水地区および神奈川県三浦郡葉山町地区の津波避難シミュレーションを実施した。その結果、条件に応じた避難計画の数値評価が可能であり、その最適化に貢献できることを確認した。

キーワード：シミュレーション, 防災, 3次元地理情報, 避難, 津波

1. はじめに

津波や火災、大雨、洪水など、その到来が事前に予測できる災害は、適切な避難行動により人的被害を大幅に低減できる場合がある。内閣府は、その実現のために地域防災計画や避難計画の策定支援を実施し、各地方自治体などの組織に対して、防災基本計画および原子力災害対策指針に基づいた地域防災計画の作成を求めている[1]。各自治体などは、その管理地域の地理的特性や人口、ライフスタイルなどに適合した避難計画を作成している。

適切な避難計画の整備は、人的被害を低減するために重要であるが、その有用性を検証する手段は限られている。特に、全地域住民を対象とした大規模な実働実験は困難であり、限定的な範囲で実施した防災訓練や災害発生後に得られた教訓を参考に計画の改善に取り組むのが一般的である。

本稿では、避難計画の有用性を事前評価する工学的ツールとして3次元避難シミュレーションを活用する試みと、その開発事例ならびに基礎的な数値実験結果について紹介する。

2. 関連研究

避難シミュレーションに関する開発事例の一つとし

いわきり むねとし
防衛大学校情報工学科
iwak@nda.ac.jp
みやざき ゆうすけ
防衛大学校理工学研究科情報数理（現在、海上自衛隊勤務）
たけのうえ のりあき
株式会社グローバルセキュリティ（防衛大学校非常勤講師）
かとう けん
防衛大学校公共政策学科

て、川合ら[2]による鎌倉市の津波避難シミュレーションがある。本シミュレーションは、被災予想範囲を可視化し、防災計画に資する基礎データの提供が可能である。1万人が避難する様子を再現することにより、現状の避難計画の課題を浮き彫りにした。

中村ら[3]は、大学構内での避難の際に発生する人流のシミュレーションを開発した。本シミュレーションは、地形データの作成にUAV（無人航空機）などによる写真測量技術を用い、交通工学の観点から人流の再現を目指したものである。実際の避難訓練とシミュレーションの数値比較では、狭い通路での混雑状況が再現できることを確認している。

これらの研究事例から、避難シミュレーションを用いた避難計画の評価と改善には一定の効果があり、各地域特性（地形や住民、想定災害など）への対応と早期実用化が望ましいといえる。

3. 走水地区避難シミュレーションの開発と評価

3.1 概要

われわれは、先に述べた研究事例と同様、避難計画の有用性に関する評価と検証に、3次元避難シミュレーションを活用することを検討している。特に、起伏の激しい地形や避難者の行動に関する3次元空間のシミュレーションモデルを高精度に完成させ、人の流れや避難時間、地形の影響などを数値的に確認し、避難計画改善に貢献することを目指した。

本研究目的達成のため、今回開発した走水地区避難シミュレーションには、身体運動が可能な人型の避難エージェントを採用し、空間モデルとして起伏の激しい山岳地形モデルを導入した。その結果、標高情報が

重要である津波からの避難想定への対応や山道など狭い通路に関する人流（渋滞状況）評価が可能となった。

3.2 評価対象地区と想定災害、開発環境

本研究で評価対象とした地域は、神奈川県横須賀市走水地区（以下、走水）である。図 1(a)(b) は、走水周辺の鳥瞰図である。主な周辺施設は、防衛大学校、自然公園、漁港、海水浴場、官公庁宿舍、美術館、ホテルである。図 1(a) の高台にある防衛大学校がこの地区の広域避難場所であり、同図 (b) のように自然公園内の山道が津波などからの避難経路として利用できる。走水海岸と防衛大学校の標高差は 80 m 以上あり、その避難経路は比較的急な坂道である。

走水地区避難シミュレーションは、Epic Games 社の Unreal Engine 4（以下、UE4）を用いて開発した。UE4 は、3 次元の地形データ読み込みが容易である。UE4 で使用可能な人型エージェントは、避難者の歩行や動きを再現する速度などのパラメータが各個体ごとに設定できる。UE4 の映像表現能力は、アニメーション制作にも採用されるほど高く、細部にわたってリアリティのある高精細な描画が可能である。

3.3 地形モデルの作成

図 2 は、地形データ生成処理の流れである。本研究では、地形データの作成に国土交通省国土地理院から提供を受けた航空レーザ測量データおよび空中写真データを使用した。航空レーザ測量データは平面直角座標系上の 0.5 m から 1.0 m 間隔に 1 点程度の標高データ、空中写真データは地形表面のテクスチャ情報とし

てそれぞれ使用した。UE4 で用いた地形データは、航空レーザ測量データから作成したハイトマップデータ（3 次元の地形モデル）に、テクスチャとして空中写真データを適用したものである。建物や道路、海などの地表物は、空中写真や地図情報を参照し、手動操作によって UE4 の空間モデルに追加配置した。

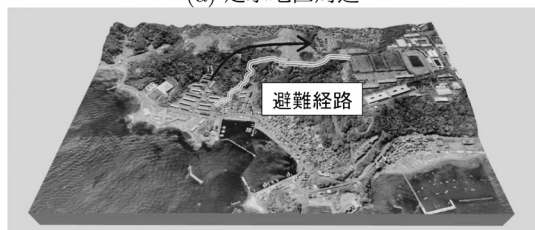
3.4 実験条件と評価目的

本実験では、歩行速度と避難経路、地形の影響を本シミュレーションにより数値的に検証できるかを確認した。走水は、想定避難人数に対し、高台へと登る避難経路が狭く、その数も限られるため、渋滞発生が予想される。まず、避難経路を最短の経路に限定してシミュレーションを実施したところ、避難エージェントの歩行速度差により複数箇所で渋滞することが確認できた。

そこで、初歩的な試みとして、避難計画として複数経路を指定した場合の避難時間に関する数値評価を実施した。図 3 は、本実験で 600 人の避難エージェントを配置した走水地区と、防衛大学校（避難場所）への避難経路（2 経路）を示したものである。各避難エージェントは、すべて同じ避難場所を目標に前進させた。歩行速度は、2.0～4.0[km/h] の範囲でランダムに設定した。



(a) 走水地区周辺



(b) 避難経路の一例

図 1 評価対象地区の概要

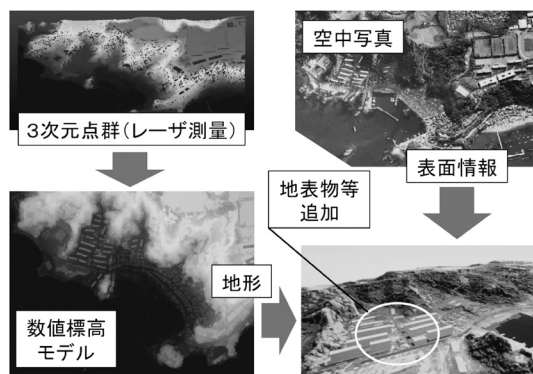


図 2 地形モデル作成



図 3 避難経路

表 1 実験条件

条件	G_S	G_F	予想
1	無作為割当		複数箇所で渋滞が発生
2	P_L	P_S	G_S の避難時間が長い
3	P_S	P_L	全体の避難時間が短い



図 4 避難の様子

本実験では、 G_S を、歩行速度が中間値 3.0[km/h] 以下の遅いグループ、 G_F を、それ以外の歩行速度が速いグループとした。また、 P_L は長い経路（約 1,300 m）、 P_S は短い経路（約 1,150 m）とした。表 1 は、避難シミュレーションに用いた歩行速度 $\{G_S, G_F\}$ と経路長 $\{P_L, P_S\}$ の組および各実験条件 1~3 の予想結果（仮説）である。避難エージェントは、移動間に重なることができないため、足が遅い者が前方にいた場合は渋滞が発生する。図 4 は、本シミュレーション実行時の様子である。

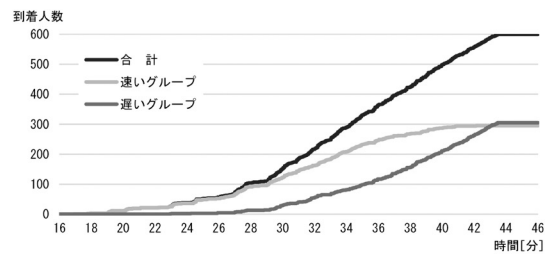
3.5 実験結果

図 5 は、縦軸を到着人数、横軸を開始地点から避難場所までにかかった時間（避難時間）として、2 分刻みの累積到着人数をグラフ化した実験結果である。条件 1 と条件 2 を比較すると、足の遅いグループに経路長の長い経路を指定することで、足の遅いグループの避難時間が長くなることが確認できた。条件 2 と条件 3 を比較すると、わずかな変化ではあるが、条件 3 の方が、全体の避難時間が短かった。これらから、おおむね仮説どおりの実験結果が本シミュレーションにより再現できることが確認できた。

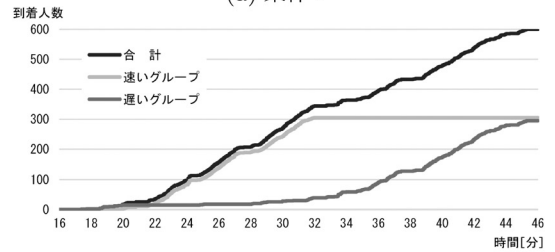
条件 1 と条件 2 に比べて、条件 1 と条件 3 の全員到着の時間差は少ないが、歩行速度が早いグループの避難完了時刻に改善が見られた。

これらの結果から、避難者の歩行速度に応じて避難経路を割り当てることにより、身体能力の違いによる避難遅延を解消できることがわかった。

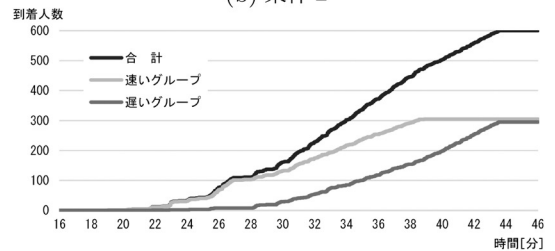
本検証実験の結果、さまざまな条件に基づいた避難



(a) 条件 1



(b) 条件 2



(c) 条件 3

図 5 実験結果

シミュレーションを行うことにより、数値比較が可能であり、避難計画の改善に貢献できる可能性を見出すことができた。

4. 葉山町避難シミュレーションの開発

4.1 概要

神奈川県三浦郡葉山町は、三浦半島の西側相模湾に接しており、夏の行楽シーズンになるとその海岸周辺には多くの海水浴客が訪れる。海岸付近の平地には、住宅地が密集しており、急峻な段丘が存在する。その高台は、津波からの避難場所には適しているが、そこに至る経路は全般に狭く多人数が短時間で避難する際の障害になると予想される。

そこで、葉山町が整備している防災計画のうち、津波からの避難計画に関する 3 次元シミュレーションの開発とその数値評価に現在取り組んでいる。

4.2 開発環境

走水地区避難シミュレーションの開発に用いた UE4 は、人型避難エージェントモデルの細かな動きや点レベルでの移動、モデル中心からの距離ベースで

の衝突判定が可能であり、狭い空間に関する人流再現や動向の観察には適していた。しかしながら、その処理はリアルタイムベースであるため、大規模かつ多人数を対象とした数値評価の実施には処理コストの観点から不向きであった。

そこで、葉山町を対象とした避難シミュレーションには、膨大な数のオブジェクトを多次元ベクトル空間内で効率的に管理し、高速にストリーム処理 [4] できる株式会社グローバルセキュリティー (<https://www.gsec.biz/>) の複雑系シミュレーション基盤 (SCS: Simulation for Complex Systems) を用いることにした。SCS を用いた開発事例として、噴石飛散シミュレーションがあり、その高速処理性能については確認済みであった [5]。

4.3 避難シミュレーションの想定と実験条件

南海トラフ地震が発生した場合の津波到達は、約 80 分後であり、その高さは最大約 8 m と想定されている。各海水浴場には、それぞれ年間数万人が訪れ、1 日当たりの滞在者数は、全体平均で 1,500 人を超えることになる。

今回の対象地域は、森戸海岸（森戸海水浴場）周辺とし、避難者数を 500 人（100 人/地点の 5 箇所）とした。各避難エージェントは、走水地区避難シミュレーションと同様、歩行速度の異なるものを一定の割合で発生させた。この避難エージェント発生率は、シミュレーションのパラメータとして任意に設定できる。避難場所は、葉山小学校、葉山中学校、長柄小学校、東伏見東公園、葉山町福祉文化会館の 5 箇所とした。本シミュレーションの地形モデルの作成には、国土交通省国土地理院が配布している数値標高モデルと基盤地図情報の各データを用いた。図 6 は、本避難シミュレーションに設定した避難経路および避難場所である。

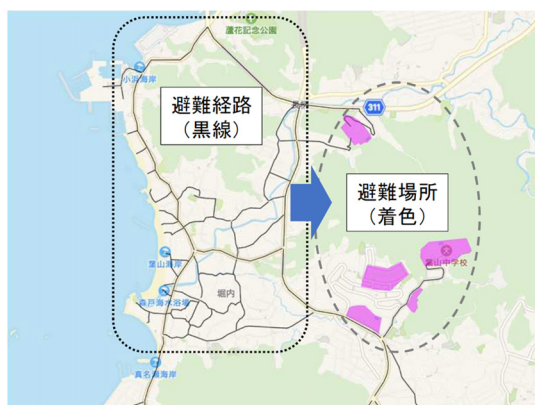


図 6 避難経路および避難場所

各避難エージェントには、発生地点から最寄りの避難経路を最初の目的地として移動させ、到着後は各避難経路ごとに設定された避難場所に向けて前進させた。各避難エージェントは、図 7 に示したビジョン機能を有しており、目視によって障害や通路を認識可能である。各避難エージェントには、自己位置周辺の状況に基づいて、次の行動に関する意思決定をさせた。すなわち、各避難エージェントは、3 次元モデル上を、障害物を自動的に回避しながら移動することになる。

4.4 避難シミュレーションの実行結果と考察

本実験では、本避難シミュレーションにより各避難エージェントが避難場所までの移動に要する時間を計測し、数値評価の可能性を確認した。図 8 は、避難エージェントを配置（拡大表示により可視化）した初期状態であり、図 9 の各画像は、避難の様子と海水面（津波による水位上昇を再現）を時間経過ごとに観察した様子である。各避難エージェントは、避難

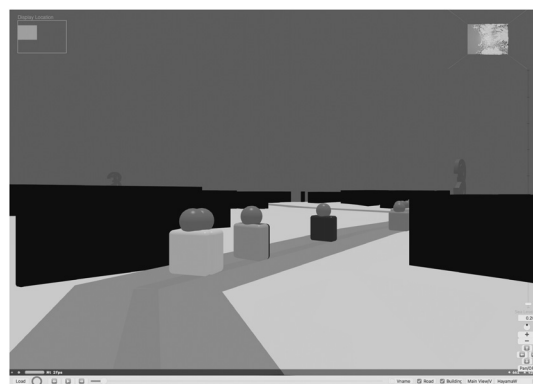


図 7 ビジョン機能

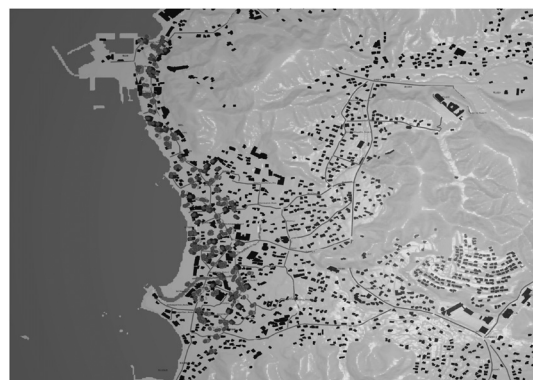


図 8 初期配置（時刻 0 分）

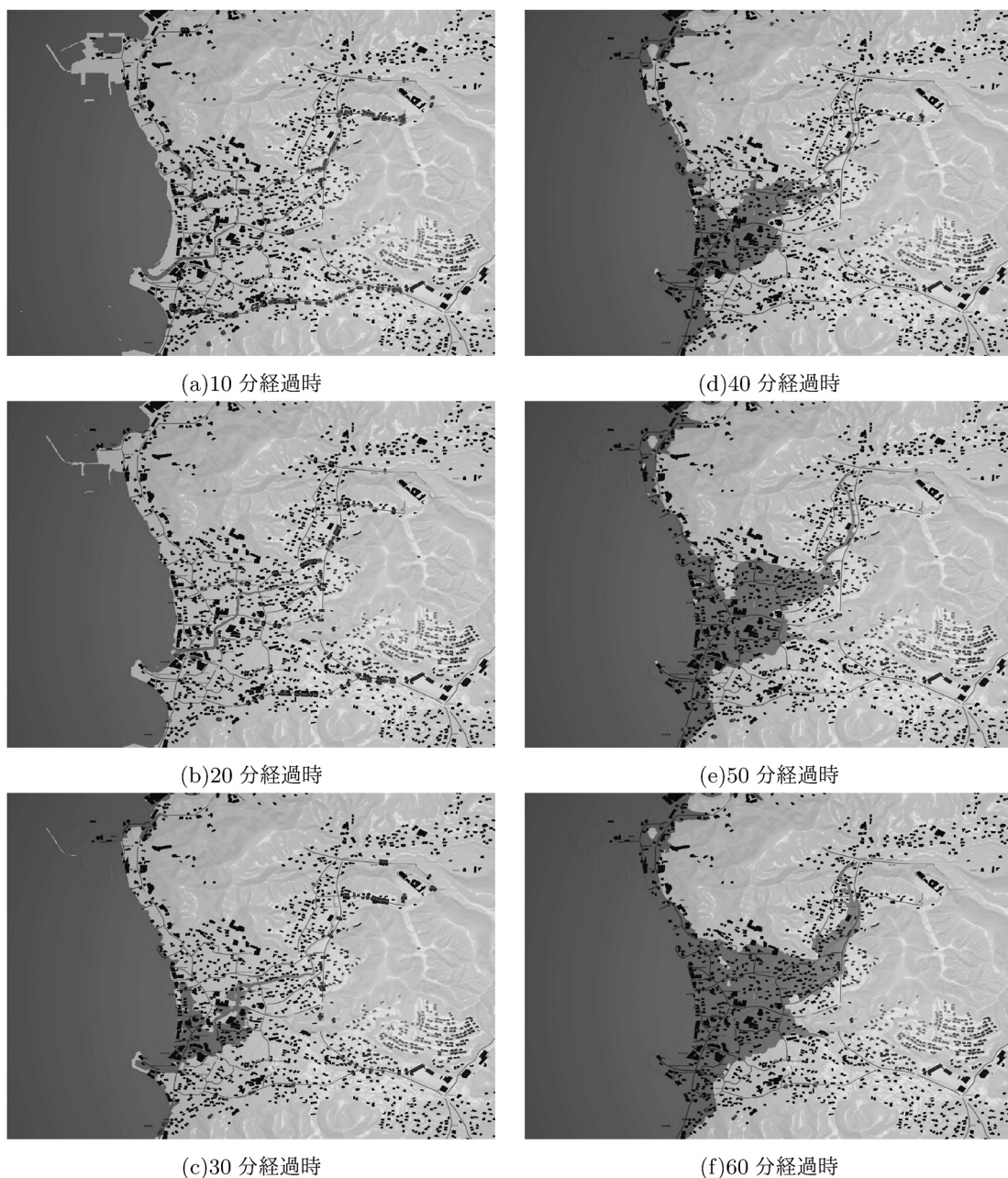


図9 各時刻の避難者位置と海水面

経路上のマーカ（○印）の位置に存在しており，時間経過に従って海水面が内陸部へ進出していることがわかる．本シミュレーションでは，避難エージェントと海水面の位置関係から，到来した津波からの避難成否の判定ができる．なお，1 個想定（シミュレーション条件）の数値実験に要する葉山町避難シミュレーションの計算時間は，iMac（2019 年モデル，Intel Core i5，メモリ 40 GB）のシングルコア処理で 1 分程度であった．

5. おわりに

本稿は，避難計画を評価改善するために，3 次元避難シミュレーションを用いる手法の実証実験結果を示したものである．本研究では，国土地理院の地形データを用いた 3 次元避難シミュレーションを実際に作成し，走水および葉山町を対象とした高台への避難状況を数値計算により再現できることを実験的に確認した．

走水地区を対象としたシミュレーション実験では，

複数の避難計画を数値比較し、その改善に貢献できる可能性を見出すことができた。葉山町を対象としたシミュレーション実験では、新たにSCSを用いることにより、森戸海岸周辺 500 人規模の避難想定シミュレーションを約 1 分で実施できることがわかった。

これらの実証実験の結果、3 次元避難シミュレーションの開発と整備実用化は、より洗練した避難計画の作成に有用であり、災害発生時の被害低減に役立つことがわかった。

参考文献

[1] 内閣府,「内閣府地域防災計画・避難計画策定支援」, <https://>

www8.cao.go.jp/genshiryoku.bousai/keikaku/keika.html (2019 年 8 月 7 日閲覧)

- [2] 川合康央, 海津ゆりえ, “エージェントによる津波避難行動と被災箇所の特長,” 人工知能学会全国大会論文集, https://doi.org/10.11517/pjsai.JSAI2019.0_4Rin134 (2019 年 8 月 7 日閲覧)
- [3] 中村栄治, 小池則満, 山本義幸, “3 次元避難シミュレーションと実際の避難訓練との比較検討,” 地域防災研究センター年次報告書, **14**, pp. 67–70, 2018.
- [4] 竹之上典昭, “ストリームコンピューティング,” 防衛技術ジャーナル, No. 442, pp. 4–12, 2018.
- [5] 岩切宗利, 竹之上典昭, 山田浩之, 佐々木寿, 宮崎裕輔, 國武千人, “火山噴石飛散シミュレーションの開発とその応用,” 画像ラボ, **32**(4), pp. 25–30, 2021.