

津波災害からの 住民避難シミュレーション

防衛大学校 人文社会科学群 公共政策学科

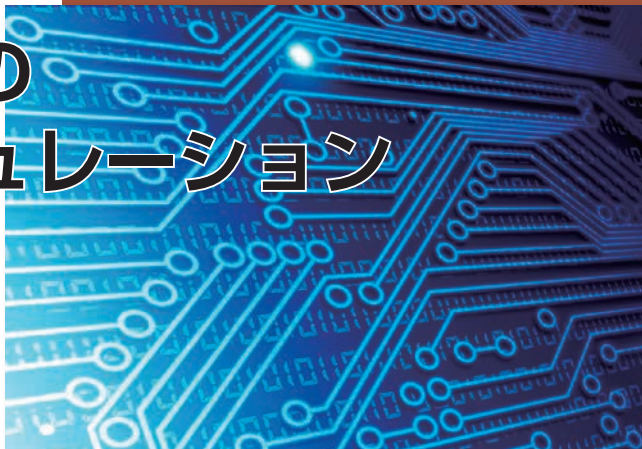
准教授 加藤 健

防衛大学校 電気情報学群 情報工学科

准教授 岩切 宗利

株式会社 GSEC

CTO 竹之上典昭



はじめに

前回までで、都市計画シミュレーション (LSS: LandScape Simulator) の技術および具体的な適用例などを述べてきた。今回は LSS の更なる適用例として、津波被害からの避難民シミュレーションについて、そのシナリオとシミュレーション実現の技術について紹介する。

避難民の想定とシナリオ

(1) 避難民の想定

今回、避難民シミュレーションの舞台となるのは、神奈川県三浦郡葉山町の海水浴場である。町は神奈川県の南東部で三浦半島の北西部に位置し、北は逗子市に接し、南東は横須賀市、西は相模湾に面している。町の面積は、17.04km² であり、海岸線は南北直線距離約 4 km である。この約 4 km の海岸線には、森戸海岸、一色海

岸、長者ヶ崎・大浜海岸と呼ばれる海水浴場があり、毎年夏になると海水浴客で大きな賑わいをみせている。その海水浴客の規模は表 1 のとおりである。

例年、夏季のシーズンには三つの海水浴場で、平均10万人規模の海水浴客が訪れている。これらのデータは、海水浴場が開かれている7月5日～8月31日までの合計人数である。従って、この57日間の1日当たりの平均海水浴客数は、土日や祝日、夏休み等でのバラツキを考慮せずに単純平均で考えると、三つの海岸合計で1日当たり、1,800人という計算になる。

仮に、この期間中に南海トラフ巨大地震が起これば、津波が襲来するとなると、葉山町は、地理に不案内な観光客や海水浴客約1,800人を高台まで避難させねばならないこととなる。神奈川県が公表している「津波浸水予想図」では、南海トラフ巨大地震が起こった場合、震源地のシナリオによっては、81分後に8.1mの津波が到達することが予想されている。

表 1 葉山町における海水浴客数の動向

(単位：人)

	令元	平30	平29	平28	平27	平26	平25	平24
森戸海岸	29,266	33,189	30,223	43,273	38,801	31,310	36,866	35,155
一色海岸	49,181	65,546	59,410	58,558	45,223	42,693	43,746	35,855
長者ヶ崎・大浜海岸	14,922	18,711	14,462	13,115	14,003	12,870	16,012	15,551
合計	93,369	117,446	104,095	114,964	98,027	87,143	96,624	86,561

(出所：神奈川県ホームページ「令和元年度開設の県内海水浴場利用者数」¹⁾)

すなわち、「葉山町の地理に暗い」そして「周囲が見知らぬ者同士」という特性をもつ海水浴客たちを葉山町は81分以内に1,800人を高台まで避難させなければならないことになる。町には三つの海水浴場があるため、単純平均で一つの海水浴場につき約600名の避難が必要となる計算である。もちろんこれは単純平均値であるため、快晴の週末で正午頃の時間帯に巨大地震が発生するという最悪のシナリオでは、避難民の規模は数倍から十数倍に膨れ上がるであろう。

(2) 災害時の人間行動

過去の災害事例からも明らかなように、災害に直面した人間にはさまざまな心理的作用が生じ、それらが避難行動、特に避難しない行動へと影響を及ぼすことが知られている。一番身近な例でいえば「オオカミ少年」であろう。自治体が避難指示を発令しても、結果的に大きな災害は起こらなかったという空振りが何度も続くと、住民は徐々に自治体の警報を信用しなくなり、最後には警報が発令されてもまったく避難しようとしなくなってしまう現象である。

また近年、警報についてはその発令のあり方も避難行動へ影響を与えることが知られている。例えば、災害が軽微な段階でまず緊急度の低い警報が発令され、災害状況の深刻化に伴い次第に警報のレベルが段階的に引き上げられることがある。こうした警報レベルの段階的な引き上げは、危険な状況が刻々と迫っているにも関わらず、人間の心理に常に小さな不安感しか与えないことが知られている。このような現象は「ゆでガエル」と呼ばれる。「ゆでガエル」とは、二匹のカエルを用意し、一匹は湯の釜へ入れる。そしてもう一匹は水の釜へ入れ、その水を徐々に熱していく。二匹の行動を比較すると、湯に入れられたカエルは直ぐに飛び出して逃げってしまう。これに対し、水を緩やかに熱していった釜のカエルは、次第に熱い湯に慣れていき、最終的に逃げ出すタイミングを失って茹で上がってしまうという喩え話である。すなわ

ち、段階的に警報のレベルを引き上げていくと、人間は徐々に大きな警報に慣れていてしまい、最終的に避難するタイミングを見失って逃げ遅れてしまうのである。こうした災害時における人間の心理バイアスには枚挙にいとまがない。

突発的に発生する噴火災害やテロ攻撃では、爆発音を聞いた人の多くは、その音を「落石」や「花火」と勘違いし、逃げ遅れてしまうことがある。このような心理バイアスは「正常性バイアス」と呼ばれる。すなわち、自分が耳にした爆発音は「噴火」や「銃声」などのような危険なものではなく、きっと「落石」や「花火」のような危険ではない、つまり「正常なものだ」と思い込んでしまうバイアスである^{2), 3)}。

災害時に過去と同じ行動をしてそれが裏目に出てしまうということもある。これは「経験の逆機能」と呼ばれる。例えば、日本において大震災と呼ばれる災害には三つある。「関東大震災」「阪神淡路大震災」「東日本大震災」である。これらを比較した場合、関東大震災では火災旋風による焼死が、阪神淡路大震災では建物の倒壊による圧死が、そして東日本大震災では津波による溺死が死因の大多数を占めている。同じ大震災と呼ばれる地震でも、その都度、死因は大きく異なる。同じ災害は二つとない、とよく言われるが、人間は「以前はここまで津波は襲来しなかったから、今回もきっと大丈夫だろう」というように、過去の災害経験がそのまま目の前の災害にも適用可能だと考えてしまいがちである。ここで取りあげた「オオカミ少年」「ゆでガエル」「正常性バイアス」「経験の逆機能」といった心理バイアスは、いずれも「避難しない」という行動選択へと作用し、結果として逃げ遅れることにつながってしまうこととなる⁴⁾。

(3) 津波避難のシナリオ

それでは、津波災害の場合はどうであろうか。地震は誰しもが体感できる災害であり、それに続く津波の襲来も容易に想定できるものであ

る。しかしながら、それにも関わらず過去の津波災害事例をみても即座に人々の避難行動は起こらない。例えば、危険が迫っていても周囲の人が避難しなければ「周囲が避難していないから、たぶん危険性はないのだろう」「周囲が避難を始めたら自分も避難をすればいい」「避難をするのは面倒くさい」といった心理から避難が阻害されてしまうことがある。こうした人間の心理は「集合的無知」や「同調バイアス」、「現状維持バイアス」と呼ばれる。この結果、心理的作用によって避難行動が促進されず、かえって抑制されてしまうこともある。こうした状況は、今回想定する海水浴を主体とした観光客のように、周囲に多数の人がいるがお互いに見知らぬ者同士という環境下において発生しやすい。すなわち、どのように行動するのが最善であるのかが分からない曖昧な状況下でこれらの心理的バイアスは生じやすいことが知られている。

一方で、自分の周囲で避難を開始する人が増加するにつれ、「自分も避難しておこう」という同調バイアスが避難行動へ作用し、避難への転機につながることもなる。このとき、海水浴客は避難行動を開始するが、緊急避難所も避難経路もまったく知らないという曖昧な状況下に置かれている。このとき人間は、周囲が避難する方向へ自らも避難しようとする傾向にある。こうした人間の行動心理は「追従性」と呼ばれる。今回の避難民シミュレーションでは、特にこの「追従性」と呼ばれる心理的要素をモデル化しているところに特徴がある。

表2 避難民の構成と避難速度

集団の構成	避難速度	避難速度のイメージ
おとな1名	1.0	分速180m (ランニングの速さ)
おとな2名	0.9	
おとな3名	0.8	
おとな4名	0.7	
おとな2名 &こども1名	0.4	
おとな2名 &こども2名	0.3	分速54m (ゆっくり歩行程度)

今回、避難民を避難させる場所は、葉山町が津波災害時に指定している公的な指定緊急避難所（5カ所）である。避難民は、これらのうち最寄りの避難所を探索し、5カ所のいずれかに避難をする。避難民の避難速度に関しては、より現実に即し集団の構成や人数規模によって、その避難速度を6パターンに調節している（表2）。

避難民に付与する能力とシミュレーション環境技術

本シミュレーションにおける津波被害の避難民は、表3のように、地域住民と観光客という2種類の人々がシミュレーションの場に登場する。地域住民は、緊急避難所も避難経路も知っており整々と避難する行動をシミュレートすれば良い。しかし、観光客は緊急避難所も避難経路もまったく知らない。彼らは自らの知識をフル動員して避難経路を探ることになる。咄嗟に見るのは自分の周りの人々の行動であろう。少し余裕のある人は、緊急避難所はどこか、避難経路の情報は周辺に貼り出されていないか等を考えるであろう。また人によっては、取り敢えず周辺の高い所を探し、自らの判断で高所へ避難しようとする人もいるであろう。シミュレータに必要なのは、こうした人間的な行動をどのようなモデルとして捉え、避難民としての能力を付与するかを決めることが必要である。

観光客となる人には、道路を見つけて緊急避難所へ避難することが求められており、その能力としては、道路を見出すことができること、周りの人々の進行方向を認識できること、緊急避難所を見出すことができること、の能力付与が挙げられる。さらに人々の歩行速度の設定・発生方法の定義が必要になる。

表3 避難民の区分と特性

避難民の区分	地域住民	観光客
緊急避難所	既知	不明
避難経路	既知	不明
避難経路の推定	不要	周辺の人々の行動から、または避難誘導情報から推定

<道路の発見>

LSS では、道路情報は図 1 に示すスクリプト言語で定義され、道路ライブラリ一括管理されている。もし、避難民に最も近い道路を探り当てようとするならば、それが実際の地図上でどこにあるのかを道路ライブラリから検索することになる。この方法は、道路の本数が少ない場合には有効であるが道路の本数が多くなると検索に多くの時間が必要になる。

この問題を解決するのが空間情報インフラ BaseBox である。BaseBox は表 4 のような内部配列を保有し、管理空間を微小空間のグリッドとして各種情報をマルチレイヤーで管理している。

そして特徴のある項目をシミュレーション対象ごとに区分したものが内部配列であり、地表面の標高を管理する Elevation、地表面の移動体に関する各種情報を管理する WalkBox、そして空中を飛翔する移動体に関する情報を管理する Box3D がある。

道路や人は WalkBox に管理されており、道路の検索を容易にしている。図 2 は、道路定義情報を読み込む時点で道路を WalkBox へ登録するときのアルゴリズムを図化したものである。この例の場合、Road-A は赤丸の 4 点のポイント座標から構成されており、その 4 点を結

```
// 道路定義
SetRoad {
// レーン属性定義
laneAttribute : person 3 0.7 ...
Nagae_Route-1 :
(35.28459307975362, 139.57005145394044) // 鐘摺葉山港入口北
(35.28521509214569, 139.570578541107)
...
(35.28596624180912, 139.57493075680736); // R134 トンネル入口
R134Tunnel tunnel :
(35.28596624180912, 139.57493075680736) // R134 トンネル入口
```

図 1 道路定義のスクリプト記述例

表 4 BaseBox 内部配列と役割

配列名	役割	次元
Box3D	空中を飛行（飛翔）する移動体を管理する	3
WalkBox	地表面を移動するあらゆる移動体を管理する	2
Elevation	標高データ：国土地理院の DEM (5 or 10m メッシュ)	2



図 2 WalkBox への道路の登録アルゴリズム

んだ経路が道路となる。WalkBox の水色部分は経路が通過するグリッドであり、この水色のグリッドに道路名：Road-A が登録される。避難民はこのグリッドのどこかにおり、自分のグリッドに登録された道路名を抽出するだけで、道路の検索は終了する。

当然のことながら、各グリッドは複数の道路名を保持できるので複雑な道路網にも容易に対応できる。また緊急避難所も WalkBox に登録されており、この検索も容易に実施できる。

<避難経路の決定：加入点>

観光客が避難経路を決定するには、さらに避難経路の自動生成が必要である。

図 3 を見れば分かるように、人は常に道路定義の両端に居るわけではない。自分の最も近い道路上のポイントから加入しなければならぬ。この加入点を求めるには、道路情報の各点で構成される線分と自分の座標との垂直な交点を求めることが必要である。近傍の道路が複数ある時は、それらすべての道路に対して加入点を求めることが必要である。複数の加入点を求

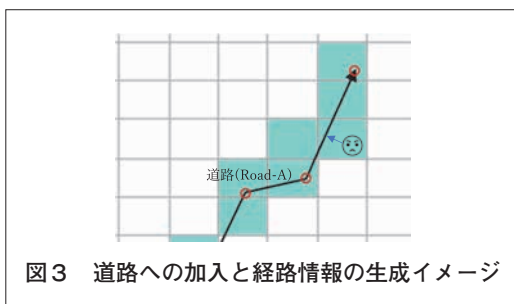


図 3 道路への加入と経路情報の生成イメージ

めることができると、次はどの加入点を選択するのかを決めなければならない。

<避難経路の決定：周辺状況の把握と経路の選定>

どの経路を避難経路とするのかは、次の手順で決定する。

- 近傍の人々を BaseBox から把握し、進行方向（方位）を求める
- 道路ごとの加入点から道路の2方向の方位を求める
- 人々の進行方向と最も近い方向を有する道路を避難経路として選択し、人の移動経路として登録する
- 移動経路の終端に近づくと避難経路の決定手順<道路の発見>からを繰り返す

※ この際、緊急避難所が近傍にあると、それを最終到達目標地点として登録する。

<緊急避難所の発見と到着>

緊急避難所は、**図4**に示した複数座標で囲まれたエリア（ポリゴン形式）で登録される。このエリアはかなり広い場合が多く、その接近をエリアの重心で判定すると認識距離が遠くなってしまう。実際場合にも避難所の発見はエリアの外枠への接近で判定すべきであることから**図4**のように2点間で構成される線分へ垂直交点を計算し交点までの距離が規定の距離以下であれば発見としている。

また緊急避難所への到着は、人がこのエリア内に入った時点を

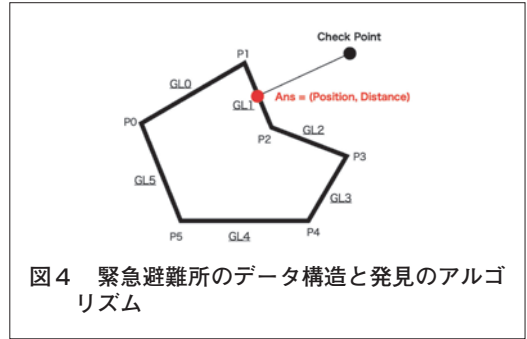


図4 緊急避難所のデータ構造と発見のアルゴリズム

もって到着としている。

<避難民の発生>

避難民を、**図5**のように海岸付近に発生させた。大きなオレンジ色の楕円の中に観光客500名、緑色の円（5カ所）にそれぞれ100名の地域住民を発生させた。地域住民には発生時に避難経路と緊急避難所を付与することで発生させた。観光客は避難経路等を与えられておらず、自ら経路を選択して避難をすることとなる。

今回のシミュレーションでは、観光客500名のものと観光客および地域住民合わせて1,000

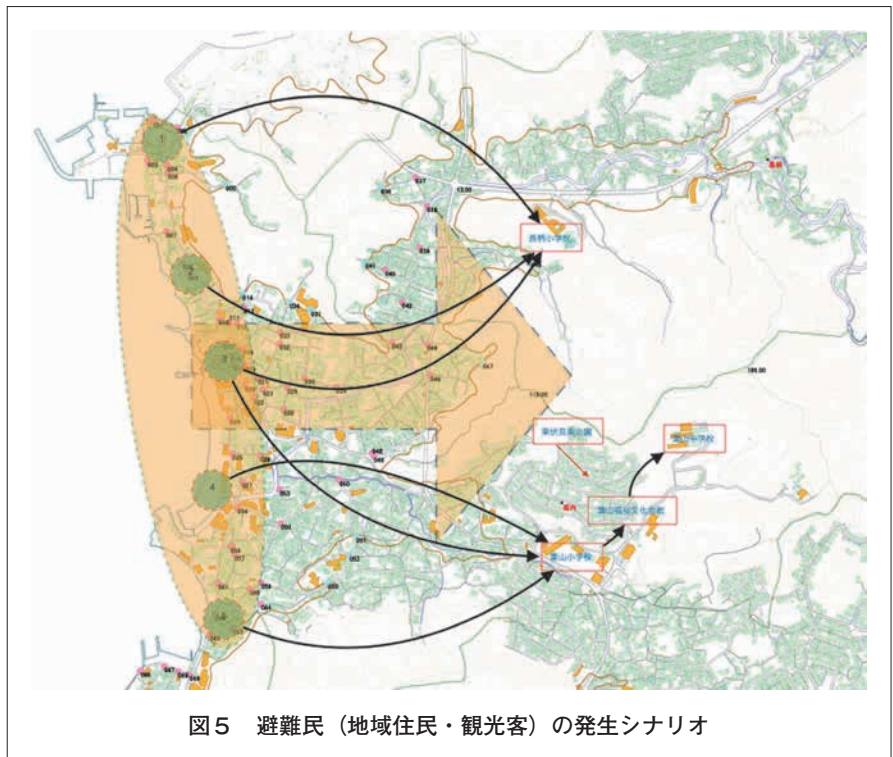


図5 避難民（地域住民・観光客）の発生シナリオ

名のものの2バージョンを実施した。

シミュレーション結果の活用

今回のシミュレーション結果は、将来的に二つの方向への活用が期待される。一つ目は、自治体の防災計画の改善である。都道府県を含め、各市町村の地方自治体は災害対策基本法によって、地域防災計画の策定が義務づけられている。今回のシミュレーション結果は、こうした防災計画の改善に資するものとなるであろう。特に津波被害が想定される全国各地の沿岸部の自治体においては、今回の葉山町でのシミュレーション結果を敷衍し、自らの自治体の防災計画の改善に反映することも可能となる。こうした自治体レベルでの地域防災計画の整備・改善は、津波災害時において、住民と観光客の命を救う「公助」につながるであろう。

二つ目は、観光客や海水浴客、そして地元住民に対する津波避難の啓発活動である。観光客や海水浴客に対しては、早期の避難開始によって、いかに生存率を上げることが可能となるかをシミュレーション結果に基づいて可視化することができる。すなわち、一人ひとりが津波災害と津波避難への理解を深めることによって「自らの命は自分で守る」という「自助」意識の醸成につながる。同時に、地元住民に対しては、地理に明るい地元住民が率先して避難を開始することにより、地理に暗い観光客や海水浴客の生存率を上げることが可能となることをシミュレーション結果に基づいて可視化することができる。地元住民の率先避難が自分や家族のみならず、見知らぬ周囲の命も救うという「共

助」につながることを、今回のシミュレーション結果を通して啓発することができる。

以上のような観点から、今回のシミュレーション結果を活用することにより、自治体・観光客・地元住民という三つのレベルにおいて、津波防災に対する「自助」「共助」「公助」の防災力を底上げする契機となるといえるであろう。

あとがき

今回は「都市計画シミュレータ：LSSの適用事例として津波災害からの住民の避難シミュレーション」について紹介した。これまでの回では、LSSの適用事例として「車の性能評価としてセンシングから状況判断、そして経路選択等の判断機能のシミュレーション」「中都市の主要な道路網を入力し、数百台の車や人の動きから、鉄道とその乗客等を一括して評価するシミュレーション」そして「東京オリンピックのような多数のドローンの飛翔経路を瞬時に解く群制御シミュレーション」などを紹介してきた。

これらのシミュレーションは一般的には、大規模シミュレーションとして従来捉えられているものばかりであるが、このLSSは超高速なシミュレーション基盤：SCS (Simulation for Complex Systems) の成果により、卓上のパソコンで稼働している。

今回は、安心安全な社会を目指す日本に必要なシミュレーション技術として、津波災害からの住民の避難や火山爆発によるにおける噴石の飛散状況を従来のような同心円状の被害予測とは異なり、地形に沿ったより具体的なシミュレーションなどの研究状況について紹介する。

引用文献

- 1) 神奈川県ホームページ、“「令和元年開設の県内海水浴場利用者数」”、[オンライン]. Available : <https://www.pref.kanagawa.jp/documents/11326/2019kasui.pdf>.
- 2) 小川さゆり、『御嶽山噴火 生還者の証言』、ヤマケイ新書、2016.
- 3) 山と溪谷社(編)、『ドキュメント御嶽山大噴火』、ヤマケイ新書、2014.
- 4) 加藤健、「体内警報システムの機能不全—避難行動の心理的メカニズム—」、災害情報、2010.