

災害時における避難所の混雑予想を可能とする避難行動モデルの研究

佐々木 淳

1 はじめに

日本では地震・台風・大雨といった自然災害が多発している。特に台風は地震とは異なり事前に来ることが予想される災害でありながらも、一向に被害が減少しない。2016年の台風10号では死者26人、2018年の台風21号では死者14人、2019年の台風19号では死者105人と、毎年のように人的被害が生じている。自然災害による人的被害への対処には、発災後の情報共有、発災前の状況予測の2種類が挙げられる。このうち、発災前の状況予測では、気象庁による気象警報・注意報の発令や自治体による避難所の混雑状況の共有が行われる。先行研究として、本研究者は避難所の混雑状況をリアルタイムに把握できるアプリケーションの開発を行ってきた。しかし、発災後の情報共有だけでは変化する災害状況への対応が送れるという課題があった。例として、2019年の台風19号では、避難所が収容人数を超過し、受け入れを停止する状況が発生した[1]。また、2020年の台風10号では、新型コロナウイルスの影響で避難定員が半分に減らされた結果、多くの避難所で定員超過が発生した[2]。このような場合、避難者は避難先を変更する必要があるため、避難完了までに更なる時間を要し、被災リスクが増加する。こうした事例への対処として、発災後の情報共有に併せて、事前に災害状況を予測することが有効であると考えられる。

発災前の状況予測の手段としては、避難行動モデルが存在する。避難行動モデルは、住民の災害時の避難行動をモデル化したもので、パラメータとして与えられた住民の状態や災害の状況に応じて避難可否・避難先の意思決定を再現する。避難行動モデルを構築して避難を再現することで、災害状況下での避難戦略を被害発生前に確認できる。そこで、現実に適用可能である避難行動モデルを構築し、実際の災害への応用を図ることが必要になる。

2 関連研究

山田らは、津波避難ビルの選択に関する避難行動モデルの構築を行った[3]。津波避難ビルへの避難では、一番近くの津波避難ビルに避難すること、海方向への避難はしないことが前提となる。この条件下での避難先の選択行動の分析と行動予測に基づいた津波避難ビルの立地の検討を目的としている。モデルのパラメータ推定には、津波避難を想定したアンケート調査により得られたデータが用いられた。

西野らは、地震火災時の避難先の選択に関する意思決定モデルの推定を行った[4]。地震火災ではどこから発災するかを事前に予測するのが困難なため、危険度が高い箇所から逃れる行動を取ると仮定している。また、現実の地震火災の被災時に見られた広大な空き地へ逃げる行動を考慮し、そのようなオープンスペースの特性を潜在的な魅力度として考慮している。避難者地震の状況と、避難先の魅力度の2要素から避難選択行動を分析することを目的としている。モデルのパラメータ推定には、ヒアリング調査から得られた地震火災時の避難先と回答者の属性のデータが使用されている。

これらの研究では、災害を想定したアンケートのデータやパーソントリップ(PT)データに基づいて避難行動モデルのパラメータ推定を行っている。しかし、アンケートでは実際の災害の特徴を含まず、PTデータはGPSロガーを被験者が持ち歩く必要があり、データの入手性が低い問題がある。このようなデータを使用する場合の共通の課題として、実際の災害時にリアルタイムにデータを収集するのが困難であることが挙げられるが、既存研究ではリアルタイムでの使用可能性については触れられていない。また、これらの研究では災害時における一時点での避難先の決定のみを対象としていた。しかし、実際には災害の状況は変化するため、一回は避難しないことを決定したが災害状況の激化に伴い再度避難を検討する場合も考えられ、避難先の決定には複数回の意思決定が考慮したほうが自然である。これらの理由から、既存研究を現実に適用することは困難であると言え、現状の取り巻く環境下で利用できる避難行動モデルが求められる。データの入手性を考慮したモデルを構築するには、パラメータ推定にオープンデータを使用することが考えられる。オープンデータは、営利目的、非営利目的を問わず二次利用可能なルールが適用され、機械判読に適し、無償で利用できるデータ、と総務省により定義される。オープンデータとして公開されている災害関連の情報(以下、災害情報)の例としては、指定緊急避難場所データがある。また、災害時の避難所の滞在人数の時系列データも公開されており、リアルタイムに適用することも可能である。複数回の意思決定を考慮に入れた避難行動モデルとして、Fuらが提案した繰り返し二項ロジットモデル[5]がある。二項ロジットモデルは二つの選択肢から1つを選ぶ離散選択モデルの一つであるが、このモデルではそれを繰り返し適用する。それにより、

住民の避難可否の選択と避難先の選択行動を、時系列に従って複数回繰り返すことが可能である。

3 研究目的

本研究は、災害時における住民の避難行動モデルを構築することを目的とし、事前の避難所の混雑の予測、避難戦略の策定、避難所の設置場所の合理的な計画に反映することねらっている。

具体的には、既存研究の避難行動モデルに関する課題を解決し、現実的な状況下において住民の避難行動を推定するため、オープンデータを使用した避難行動モデルを提案する。提案手法の特徴は、第一に、パラメータ推定にオープンデータとして公開される災害情報を使用すること、第二に、繰り返し二項ロジットモデルにより複数回の意思決定を再現することである。これら二つを組み合わせた避難行動モデルを構築することにより、現実的で実用的な避難行動の推定が可能になると考えた。

4 提案モデル

本研究における提案モデルでは、過去の災害における避難所の滞在人数の推移データを使用し、住民の行動指針を逆算し、複数回の意思決定を考慮した避難行動の推定を行う。

避難所の滞在人数の推移データとしては自治体で公開されているオープンデータを使用する。例として、岩手県ではWebサイト「いわて防災情報ポータル」[6]上で推移データを公開している。このデータには避難所の開設可否、時刻、避難所名、滞在人数、滞在世帯数が属性として含まれており、災害状況の変化に伴って更新される。また、避難警報の発令、解除といったデータも地域別に提供されている。同様のデータは日本では、11の県および1つの市(岩手県、三重県、神奈川県、千葉県、群馬県、山梨県、長野県、石川県、宮城県、岐阜県、大分県、熊本市)により公開されていることを確認しており、それらの地域では本提案手法が適用可能である。

避難の推移から住民の行動指針を逆算することについては、過去の災害における避難所の滞在人数の推移データに適合するパラメータを最適化アルゴリズムにより近似解を求めることとした。最適化アルゴリズムはモデルが出力した推定値と実際のデータに含まれる正解値の誤差を最小化して、モデルのパラメータを調整するアルゴリズムであり、厳密解は求まらないが最適解を導出することが可能である。

災害時における住民の複数回の避難意思決定については、Fuらが提案した繰り返し二項ロジットモデル[5]を使用する。繰り返し二項ロジットモデルの概要図を図4.1に示す。二項ロジットモデルは二つの選択肢から一つを選ぶ離散選択モデルの一つであり、選択対象の好ましさを確率的に決定するモデルである。このモデルでは二項ロジットモデルを繰り返すことで災害状況の変化への対応を可能としている。

図4.1で、 $\text{Pr}(t_n)$ は $(n+1)$ 回目に避難すると判断した確率である。

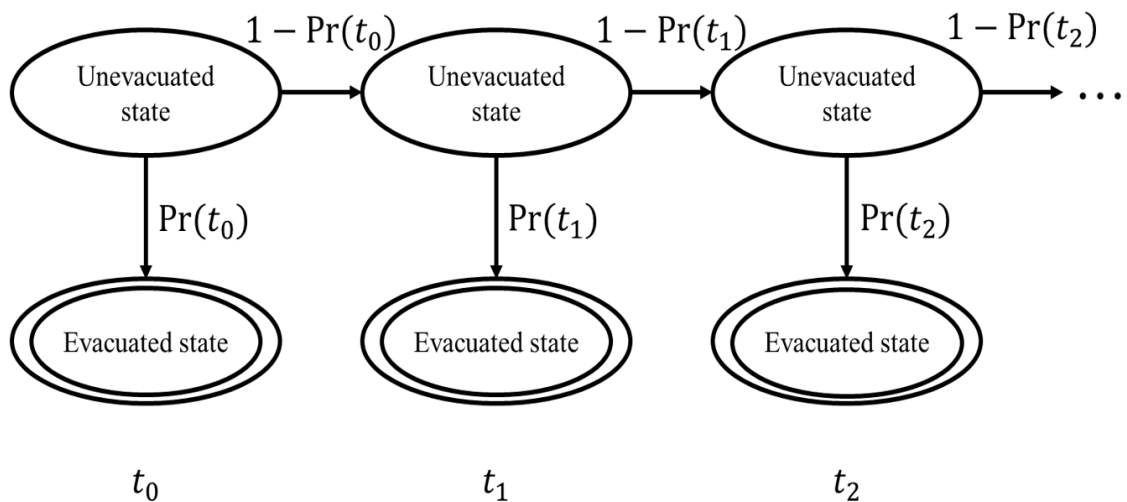


図4.1 繰り返し二項ロジットモデル

本提案手法の避難確率の決定アルゴリズムは、以下の手順となる。

- (1) グリッド（住民の居住エリア）～避難所間の避難確率算出
- (2) 避難確率に基づいた避難人数の算出
- (3) グリッドおよび避難所人口の更新
- (4) (1)に戻る

グリッドとは住民が居住する範囲を長方形に抽出した領域（メッシュ）である。グリッドに関する情報は政府統計の総合窓口(e-stat) [7] 上で公表されており、その中にはグリッドの位置、範囲、内部の人口といったデータが含まれる。

避難人数はグリッド～避難所の避難確率に各グリッドの滞在人数を乗算することで求まる。グリッドの人口には、避難しない選択肢を選んだ場合の避難人数が新たに設定される。避難所の滞在人数には各グリッドから遷移する人数の総和が新たに設定される。この(1)～(3)の手順を避難人数の変化が起こらなくなるまで繰り返す。

5 提案モデルの評価

提案モデルの評価対象の地域は岩手県久慈市とした。久慈市は岩手県沿岸部に位置する人口32,000人の都市であり、2011年には東日本大震災により2人が死亡、2人が行方不明となった。その教訓から、久慈市内では沿岸部のみならず内陸部でも自主防災組織が結成されるなど、防災に対して高い関心を示す都市となっている。久慈市を評価対象に選定した理由としては、被災経験があることから他の災害であっても避難すると予想されること、他の大都市と比較して昼夜人口の差が少なく、夜間人口のデータである国勢調査の人口データを昼間人口であるグリッドの人数をとして使用しても誤差が小さいことが挙げられる。

評価対象の災害として2019年台風19号(hagibis)による洪水被害を選定した。2019年台風19号は、2019年10月12日から13日にかけて上陸し、本州を中心に死者105人、行方不明者3人、負傷者375人の被害をもたらした。支払保険金額は台風災害では歴代2位の5,826億円と、多大な被害を及ぼしている。久慈市では死傷者は発生しなかったものの、合計937人が避難し、1,028棟に建物被害が発生した。これは主に市街地に位置する小屋畑川が氾濫したことによる影響である。久慈市では10月12日の15:40には避難勧告が発令され、23:40には避難を完了した。

久慈市の避難所の分布を図5.1に示す。人口密集地と重なる形で避難所が立地していることが確認できた。人口の少ない地域では避難所が1つまたはなかったりするので、そのような地域では避難時に避難先の選択が生じないことから、評価対象地域は岩手県久慈市の中でも市街地のみとした。

久慈市における避難者の避難元、避難先の人流を図4.2に示す。図中の三角形が住民の居住区域、丸が避難所、居住区域と避難所を結ぶ線が人流を表す。この図からは、大抵の場合において避難先は三か所程度存在しており、避難者の選択行動によりそれぞれ異なる避難所に避難することが確認できる。

実験において使用したデータの一覧を表4.1に示す。

表 5.1 使用データ一覧

名称	説明	種別, 形式
いわて防災情報ポータル（避難所情報）[6]	発災時の避難所毎の避難人数に関する時系列データ	時系列, HTML
岩手県内市町村避難場所・指定緊急避難場所データ[8]	避難所の名称や住所, 対応する災害の種類, 収容可能人数, 面積などの静的データ	時系列, PDF
指定緊急避難場所データ[9]	避難所の名称や緯度経度情報などの静的データ	非時系列, CSV
2015年国勢調査・5次メッシュ(250mメッシュ): M6041 [10]	グリッドの位置や人口に関する静的データ	ベクタ, Shapefile
京大大学生存圏 GPV 降水エコー強度[11]	降水強度データグリッドごとの降水量に関する100分ごとの時系列データ	



図5.1 久慈市の避難所

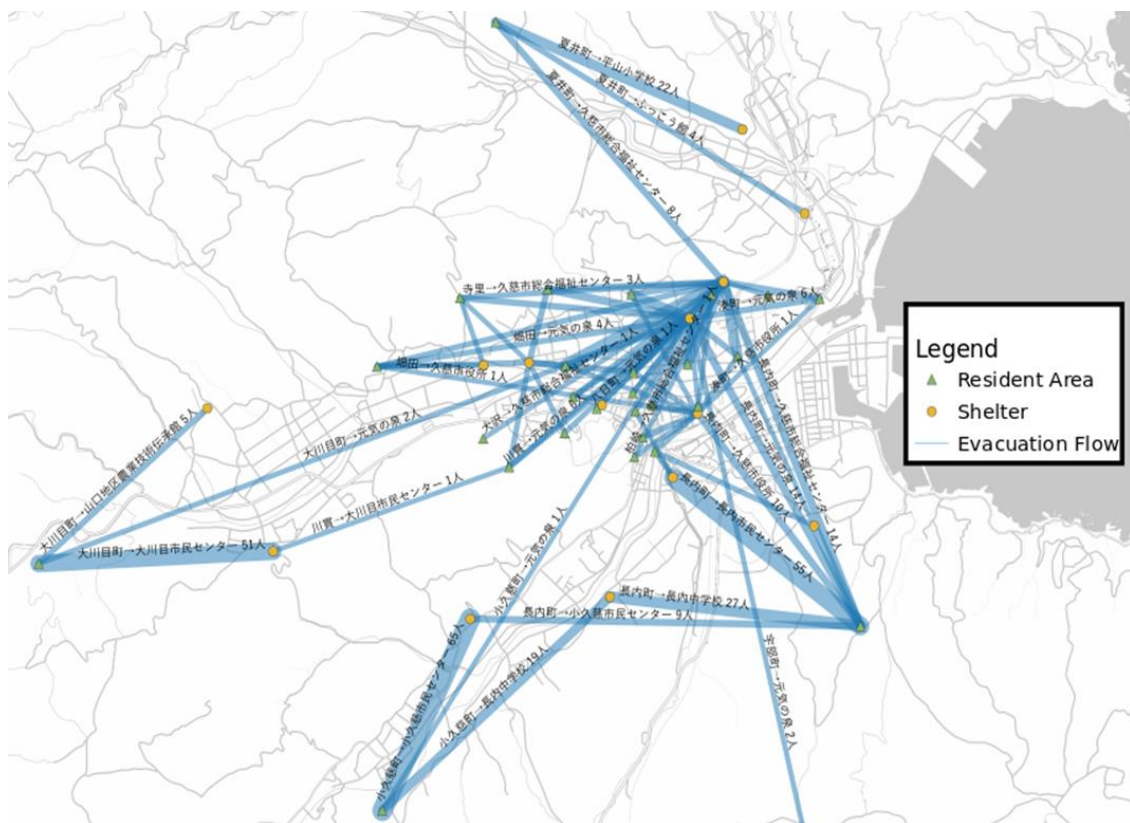


図5.2 一般避難者の避難完了人数の推移（グリッドと避難所間の人流）

提案モデルの評価で使用するオープンデータから抽出したパラメータを表5.2に示す。避難する場合には避難所関連のパラメータが使用できるが、避難しない場合にはそれらのパラメータが使用できないため、それぞれの場合において使用するパラメータが異なっている。また、避難しない場合にはダミーパラメータを設定した。

表5.2 パラメーター一覧

項目名称	説明	避難する場合	避難しない場合
経過時間	発災からの経過時間を分単位に表現したパラメータ	○	○
時刻	時刻に関するパラメータ。18時に最大値、6時に最小値を取り、夜間の避難を抑制するために設定される	○	○
グリッドと河川の距離	グリッドの中心点から最も近い河川までの距離を表すパラメータ	○	○
避難所と河川の距離	避難所から最も近い河川までの距離を表すパラメータ	○	
降水エコー強度	気象レーダーで観測されたエコー強度に関するパラメータ。グリッドごとの降水強度を表現する	○	○
避難所までの距離	グリッドの中心点から避難所までの直線距離	○	
避難しない場合ダミー	避難しないことを選択した場合に使用されるダミーパラメータ		○

提案モデルの評価においては、パラメータの組み合わせを変えた以下の三つのシナリオを用意した。

■シナリオa. シンプルモデル

経過時間、時刻、避難所までの距離、避難しない場合ダミーを用いたモデル。最も単純なパラメータから構成されたモデルで、避難行動の再現が可能であるかを検証するために設定した。

■シナリオb. 拡張モデル

シンプルモデルに加えて河川までの距離、避難所の面積を用いたモデル。パラメータを追加した場合の精度への影響を確認するために設定した。

■シナリオc. 拡張+ エコーモデル

拡張モデルに加えて、降水エコー強度を用いたモデル。降水量の多寡が住民の避難判断に大きな役割を果たすと考え、その影響を検証するために設定した。

各シナリオとパラメータの対応関係を表5.3に示す。

表5.3 シナリオとパラメータの対応関係

項目名称	シナリオ a	シナリオ b	シナリオ c
経過時間	○	○	○
時刻	○	○	○
グリッドと河川の距離		○	○
避難所と河川の距離		○	○
降水エコー強度			○
避難所までの距離		○	○
避難しない場合ダミー	○	○	○

避難行動モデルの実装において、言語はR とC++ を採用し、補助的なライブラリとしてR ではTidyverse, C++ ではSTL を使用した。データ処理をR, 最適化のため複数回実行する避難行動モデルはC++ で実装した。避難行動モデルのパラメータ推定には遺伝的アルゴリズムを使用した。遺伝的アルゴリズムは最適化アルゴリズムの一種であり、ランダムに生成されたパラメータ列を有する個体集団に対して、選択、交叉、突然変異といった操作を行うことでパラメータを最適化することを特徴とする。本評価で用いた遺伝的アルゴリズムのパラメータを表5.4に示す。

表5.4 遺伝的アルゴリズムのパラメータ

名称	数値	手法
個体数	50	–
世代数	2000	–
交叉率	80%	局所的算術交叉 (local arithmetic crossover)
交叉率	10%	一様突然変異 (uniform random mutation)
選択手法	–	ルーレット選択 (Fitness proportional selection)

上記条件の下で、警報発令から避難完了まで、10分ごとに避難行動モデルによる避難者数の再現を行った。このモデルにより再現した避難人数とオープンデータで得られた実際の避難人数との差を算出し、二乗平均誤差 (RMSE) で比較を行った。

岩手県久慈市内の22箇所の避難所における各シナリオでの推定結果について図5.4、図5.5、図5.6に示す。なお、グラフの赤線が実際の避難人数、青線が本提案モデルで推定した避難人数、グラフ内の黒文字の数値が避難所ごとのRMSE であり、背景色はRMSE が高いほど黄色が濃く表現される。

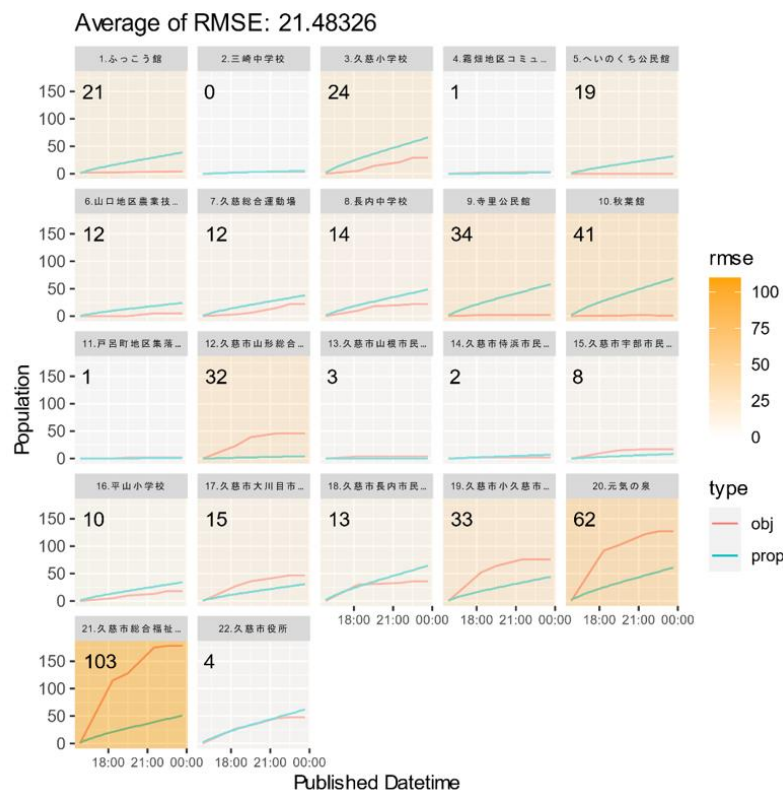


図5.4 シナリオa. シンプルモデルの結果

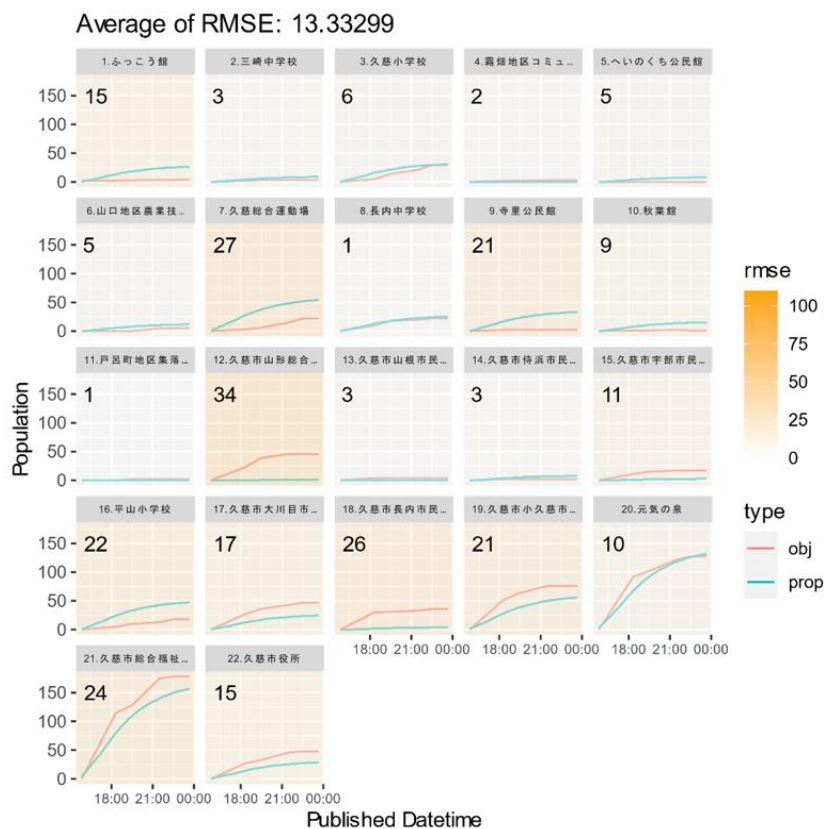


図5.5 シナリオb. 拡張モデルの結果

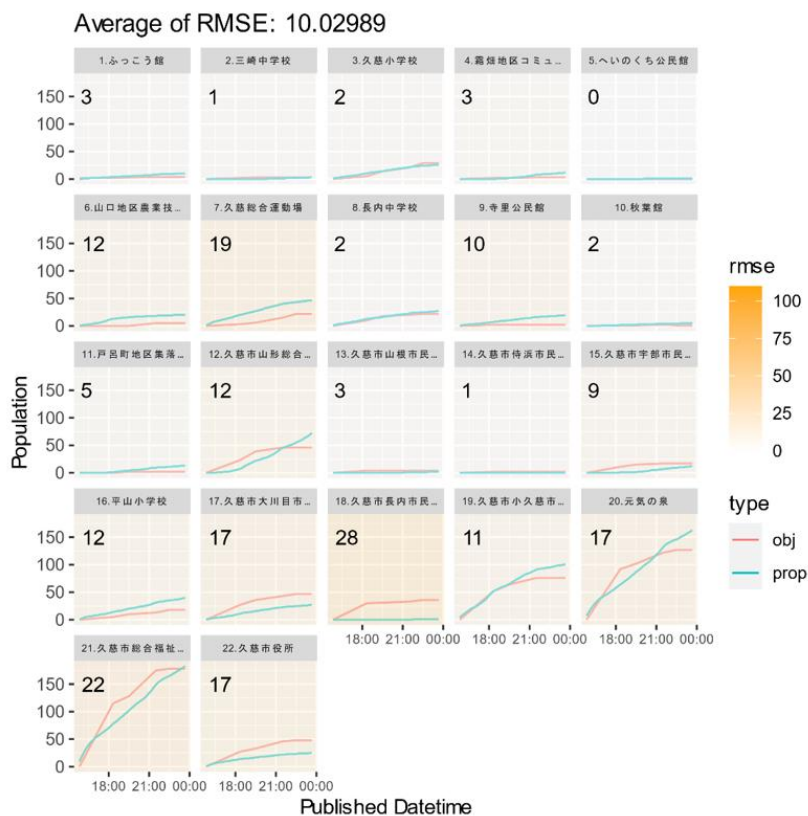


図5.6 シナリオc. 拡張+ エコーモデルの結果

全体的には避難人数が少ない場合の精度が高い傾向にあるが、避難人数が多い場合は高い精度を示す避難所21のような例もあれば、避難所18のように低い場合もある。

各シナリオにおける誤差の比較を表5.5に示す。この結果、モデルc. 拡張+ エコーモデルで最小の誤差となった。

表5.5 各モデルの誤差比較

シナリオ	平均RMSE
a. シンプルモデル	21.48326
b. 拡張モデル	13.33299
c. 拡張+ エコーモデル	10.02989

シンプルモデルでは大きく異なる値を推定していたが、拡張モデル、拡張+ エコーモデルとパラメータを増やすにつれて精度が向上することを確認した。RMSEは相対的な指標であるため絶対的な評価は行えないが、パラメータを増やすことが精度向上に直結することから将来的なオープンデータの追加に伴う精度向上に期待でき、提案モデルとしては十分に利活用可能であると考えられる。しかしながら、現状のパラメータでは避難人数を上手く再現できない避難所が存在している。例として挙げられるのが避難所18(長内市民センター)であり、実際には50人近く避難しているにもかかわらず、シナリオb,cのモデルではほとんど0人で推移していた。この件について文献調査を行ったところ、避難所周辺を流れる小屋畑川の氾濫によって被害を受けた上流部の住民が避難所18に多数避難していたことを確認した。このようなケースにおいてモデルの精度向上を図るには、実際の被害発生を考慮したパラメータを追加することが有効であると考えられる。

6 現地調査

提案モデルによる避難人数の推定と実際の人数を比較した場合、ほぼ一致する結果もあれば一致しない避難所も存在した。この原因を探るため、2021年5月26日に久慈市市街地の避難所14箇所の現地調査を行った。対象とした避難所のうち、避難所17(大川目市民センター：図6.1)、避難所19(小久慈市民センター：図6.2)では市民センターの職員の方に話を伺った。これらの避難所に共通して、住民は自主的に避難してきており、一部高齢者は自主防災組織から促しを受け避難していたことを確認できた。提案モデルでは、住民の置かれた災害状況に応じて避難することは再現していたが、自主防災組織を考慮していなかった。追加で調査したところ、久慈市においては自主防災組織の存在する行政区を公開していることを確認できた。このデータをモデルのパラメータで扱うことで精度が向上すると考えられる。



図6.1 避難所17 (大川目市民センター)



図6.2 避難所19 (小久慈市民センター)

聞き取り調査を行わなかった避難所では、避難所1(ふっこう館：図6.3)や避難所16(秋葉館：図6.4)のような、開設しているにも関わらず避難人数の少ない場所に注目した。こういった避難所は町の中心に位置し

ているが、駐車場がない、主要道路から路地に入った場所に立地している、などアクセス面での不便を抱えていた。また、いずれの避難所も町内会館であり、敷地面積が小さく収容可能人数が少ない。



図6.3 避難所1（ふっこう館）



図6.4 避難所16（秋葉館）

逆に、幹線道路沿いに立地した避難所21（久慈市総合福祉センター：図6.5）や避難所20（元気の泉：図6.6）や避難所21）などは避難人数が多く、敷地面積・収容可能人数も多いことから、このパラメータが影響したものとする。そこで、アクセス面での利便性をGIS ツールを使用して変換し、敷地面積や収容可能人数はWeb 上で入手して、モデルでパラメータとして扱う事が可能となり、精度の向上が期待できる。



図6.5 避難所21（久慈市総合福祉センター）



図6.6 避難所20（元気の泉）

7 まとめと今後の課題

本研究では、既存の避難行動モデルに関する課題を解決し、現実的な状況下において住民の避難行動を推定することを目的として、オープンデータを使用した避難行動モデルを提案した。浸水災害における避難所への避難行動モデルを示し、高い精度を示すシナリオを求めた。さらに、モデルの精度向上に必要なパラメータについて、現地調査の結果に基づいて考察した。提案手法を避難所設置計画や避難誘導に使用することで、被災者の減少への貢献が期待される。

本研究では、岩手県久慈市を対象とした提案モデルの評価を行ったが、今後は他地域でも提案モデルが適用できるか検討する必要がある。また、研究を進める中で、オープンデータのデータフォーマットがCSV やPDF、HTML など形式が統一されておらず不便を感じる場面があった。将来的にリアルタイムに避難行動推定を行うことまで考慮に入れると、データの入手性・加工性の観点からはJSONなどの扱いやすい形式でデータをやりとりするWeb API で統一し公開されていると利便性が高い。これについては、情報の公開方法やプロトコルをデータ公開元の自治体などに提言する予定である。

【参考文献】

- [1] NHK NEWS WEB. 全域避難指示の福島いわき避難所13 か所で受け入れ困難に.
<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20191013/k10012127731000.html>, 2019.
- [2] NHK NEWS WEB. 500 か所超の避難所で新規受け入れできず新型コロナの影響.
<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20200907/k10012605851000.html>, 2020.
- [3] 山田崇史, 岸本達也. 沿岸地域における津波避難ビルの選択行動モデル化. 日本建築学会計画系論文集, Vol. 80, No. 707, pp. 125- 133, 2015.
- [4] 西野智研, 樋本圭佑, 田中哮義. 地震火災時における住民の避難先選択のモデル化. 日本建築学会環境系論文集, Vol. 76, No. 663, pp. 469- 477, 2011.
- [5] Haoqiang Fu, Chester G Wilmot, Hong Zhang, and Earl J Baker. Modeling the hurricane evacuation response curve. *Transportation Research Record*, Vol. 2022, No. 1, pp. 94- 102, 2007.
- [6] 岩手県. いわて防災情報ポータル・避難所情報. https://iwate.secure.force.com/PUB_VF_HinanList, 2020.
- [7] 総務省統計局. 政府統計の総合窓口 (e - S t a t) . <https://www.e-stat.go.jp/>, 2022.
- [8] 岩手県. 県内市町村避難場所・指定緊急避難場所データ.
 Reference:<https://www.pref.iwate.jp/kurashikankyou/ankenanshin/bosai/kokoroe/1004197.html>, 2019.
- [9] 国土地理院. 指定緊急避難場所データ.
<https://hinan.gsi.go.jp/hinanjocjp/hinanbasho/koukaidate.html>, 2020.
- [10] 総務省統計局. 政府統計の総合窓口 (e - S t a t) / 地図で見る統計(統計gis) / 境界データダウンロード.
<https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=2&aggregateUnitForBoundary=Q&coordsys=s=1&format=shape>, 2022.
- [11] 京大生存圏研究所. 数値予報gvp.
<http://database.rish.kyoto-u.32ac.jp/arch/jmadata/gvp-original.html>, これらのデータは京大生存圏研究所が運営する生存圏データベースによって収集・配布されたものです

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Real-Time Mapping System of Shelter Conditions for Safe Evacuation, Emerging Technologies for Disaster Resilience: Practical Cases and Theory	Emerging Technologies for Disaster Resilience, Practical Cases and Theories, Springer Book, No.1, pp. 229-239 :10.1007/978-981-16-0360-0_12	2021 年 5 月
Development of Real-time Evacuation Support System (RESS) to Reduce Human Damage in Natural Disasters	5th IFIP WG5.15 Conference on Information Technology in Disaster Risk Reduction (ITDRR), Springer Proceedings, p14-25, DOI:10.1007/978-3-030-81469-4_2	2021 年 7 月
A Proposal of Evacuation Behavior Model by Using Open Data: A Case Study in Flood Disaster	6th IFIP WG5.15 Conference on Information Technology in Disaster Risk Reduction (ITDRR)	2022 年 4 月
オープンデータを用いた避難行動モデルのパラメータ推定: 浸水災害における事例	第 20 回情報科学技術フォーラム、O-008	2021 年 8 月
オープンデータを用いた避難行動モデルの構築と評価	情報処理学会第 84 回全国大会, 5ZL07	2022 年 3 月