

Title	津波避難時における「自動車乗り捨て」についてのモデル定式化と数値解析的検討
Author(s)	新井, 彩由
Citation	
Issue Date	2025-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/19712
Rights	
Description	Supervisor: 吉岡 秀和, 先端科学技術研究科, 修士 (知識科学)

修士論文

津波避難時における「自動車乗り捨て」についてのモデル定式化と数値解析的
検討

新井彩由

主指導教員 吉岡 秀和

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
(知識科学)

令和7年3月

Abstract

During tsunami evacuations, many people use cars as their means of escape. In the Great East Japan Earthquake, over 40% of evacuees reached their initial evacuation point on foot, while over 50% used cars. Among those who evacuated by car, the most reported issue was traffic congestion. In some areas, gridlock occurred, where vehicles were completely immobilized due to severe traffic jams.

Despite these challenges, when asked about their preferred evacuation method for future tsunamis, around 50% of respondents said they would evacuate on foot, while approximately 45% indicated they would use cars. While this shows a slight decrease in the number of people choosing to use cars, a significant portion of people still prefer to evacuate by car. However, some people who evacuated by car succeeded in surviving. Therefore, the best approach is decreasing the number of deaths without reducing car usage.

Previous studies, such as those by H. Wang et al.(2016) and Z. Wang and G. Jia(2021), have proposed "car abandonment" as a future prospect. However, this has not yet been implemented. Most researches was concluded that reducing the number of people evacuating by car was the best way to save most people.

Our study focused on "car abandonment". The goal and purpose of this research was to investigate whether abandoning cars during tsunami evacuations can reduce deaths. In this study, we defined "car abandonment" as the act of evacuees initially using a car to evacuate but switching to walking at some point during the evacuation. The number of deaths was defined as the total number of people present within the inundated area at the time the tsunami strikes.

For this purpose, we adopted a macroscopic model instead of a microscopic one. Specifically, we constructed a mathematical model based on the advection equation that expresses "car abandonment".

To solve the model, we used Python. We employed the first-order upwind difference method for discretization.

Under the initial conditions and assumptions of this study, when the maximum speed of cars was 14 km/hour or less, "car abandonment" reduced the number of deaths. When the maximum speed of cars was 15 km/hour or more, car abandonment increased the number of deaths. It was also revealed that the drop-off point with the lowest number of deaths and those with the highest number of deaths varied depending on the maximum speed of cars. Additionally, we investigated the effects of the parameter representing ease of abandoning cars. If it was too easy to abandon cars, a larger number of slow-moving pedestrians would be on evacuation routes, so which increased deaths. On the other hand, if it was too difficult to abandon cars, traffic congestion would worsen, and this reduced vehicle speed and increased the number of deaths. Therefore, it is important to determine an

optimal level for this parameter based on the specific conditions of each situation.

Finally, the model was applied to Higashimatsushima City in Miyagi Prefecture to evaluate the effectiveness of abandoning cars. As a result, unlike the initial simulations under simplified conditions, it became clear that abandoning vehicles reduces the number of deaths regardless of the maximum speed of the vehicles, both during the day and at night.

要旨

津波避難時には多くの人が自動車を使用しており、東日本大震災では最初の避難場所まで徒歩で移動した人が全体の4割強、自動車で移動した人が5割強という結果であった。また、自動車で移動した5割強の人が避難時に困ったこととして挙げた項目のうち、最も多かったのが渋滞であった。実際に渋滞で自動車が全く動けないグリッドロックと言われる現象が発生した地域もあった。しかし、今後の避難手段を問うたアンケートでは、徒歩で避難する予定と答えた人は約5割、自動車で避難する予定と答えた人は約4.5割と、多少は減ったものの、依然として自動車で避難したい人が多いことがわかる。また、実際に自動車で避難して助かった人もいたことから、自動車使用率を減らさずに死亡者数を減らすことがベストである。H. Wang et al.(2016)やZ. Wang and G. Jia(2021)では今後の展望として乗り捨てを挙げているが、まだ行われておらず、多くの研究は安全に避難する方法として自動車避難者数を減らすことを挙げている。そこで、本研究では1つの手段として自動車の乗り捨てに着目した。

本研究の目的は、津波避難時において自動車乗り捨てが死亡者数を減らすことにつながるのかについて明らかにすることとした。本研究において自動車乗り捨てとは、自動車を用いて避難する人が、途中で自動車を乗り捨てて避難手段を徒歩に変更することを言う。また死亡者数は、津波の襲来時刻に浸水領域内に存在する人の合計人数と定義した。災害時の乗り捨てに関する先行研究がほとんどないことから、本研究では災害時に乗り捨てが死亡者数を減らすことにつながりそうかどうかを概算的に求めることをまずは目指している。そのためミクロモデルではなく、マクロモデルを用いた。具体的には、移流方程式をベースに自動車や歩行者の密度分布が時間経過に伴って移動し、自動車乗り捨てを許容している区間に存在するときのみ何台かが乗り捨てるという事象を表す数理モデルを構築した。シミュレーションにはPythonを用い、一次精度風上差分法を用いて離散化した。

結果、本研究で最初に想定した計算条件や初期分布では、自動車の最高速度が14km/hour以下の時、乗り捨てによって死亡者数が減少し、逆に15km/hour以上の時は乗り捨てによって死亡者数が増加した。またその中でも自動車の最高速度によって、最も死亡者数が少なくなる乗り捨て区間や最も死亡者数が増える乗り捨て区間が異なることが明らかになった。乗り捨てやすさを表すパラメータについては、乗り捨てやすすぎても速度の遅い歩行者が増えることで死亡者数は増加し、乗り捨てにくいと渋滞で自動車の速度が遅くなり死亡者数が増加することがわかったため、ちょうどよい値を状況に応じて探ることが必要と明らかになった。最後に宮城県東松島市にモデルを適用し乗り捨ての有効性を検証した。結果、最初に行った簡単な条件でのシミュレーション結果と異なり、自動車の最高速度に関わらず夜間・昼間両方で自動車の乗り捨てが死亡者数を減少させることが明らかになった。

目次

第1章	研究背景	1
1.1	乗り捨ての定義	1
1.2	地震・津波避難の現状	1
1.2.1	内閣府と気仙沼市による調査結果	1
1.2.2	小括	5
1.3	避難ルール of 現状	5
1.4	自動車避難についての意見	6
1.5	本研究の目的	6
1.6	本研究の意義	7
1.7	本論文の構成	7
第2章	関連研究	8
2.1	研究方法に着目した先行研究レビュー	8
2.1.1	現実をどのように表現するかという視点での分類	8
2.1.2	数学的構造での分類	10
2.1.3	小括	12
2.2	研究内容に着目した先行研究レビュー	13
2.2.1	歩車混合を考慮した最適津波避難モデル (竹居, 奥村 (2017))	13
2.2.2	エージェントベースモデルに基づく, 津波避難時の避難手段 や意思決定と死亡率の関係 (H. Wang ら (2016))	15
2.2.3	エージェントベースモデルに基づく津波避難シミュレーション とリスク評価 (Z. Wang, G. Jia (2021))	17
2.2.4	小括	17
第3章	離散化方法	18
3.1	有限差分法	18
3.1.1	差分法の基本	18
3.1.2	移流方程式の差分	21
3.2	有限体積法	24
第4章	提案モデル	28
4.1	概要	28
4.2	数式	29

4.2.1	歩行者の式	29
4.2.2	自動車の式	30
4.2.3	前の車両の密度によって変化する λ	30
第 5 章	数値計算結果と考察	32
5.1	条件をシンプルにした仮想世界	33
5.1.1	計算条件	33
5.1.2	結果	36
5.2	λ_0 を変化させたとき	46
5.2.1	計算条件	46
5.2.2	結果	47
5.3	宮城県東松島市での適用例	48
5.3.1	計算条件	49
5.3.2	結果	55
第 6 章	結論	60
6.1	まとめ	60
6.2	研究の限界と今後の展望	61
第 7 章	付録	67

図 目 次

1.1	乗り捨てのイメージ図. 自動車に乗っている人が駐車場で車から下り, 徒歩に移動手段を変更する様子. (著者作成.)	1
1.2	避難場所への移動手段. 徒歩で移動した人が全体の 4 割強, 自動車 で移動した人が 5 割強であった. (参考文献 [1]p64 より転載.) . . .	2
1.3	車で避難した際に困ったこと. 3 割強の人が「渋滞」と回答. (参考 文献 [1]p67 より転載.)	2
1.4	避難途中の状況. (参考文献 [2] 図 3-22 より転載.)	3
1.5	今後想定する避難手段. (参考文献 [2] 問 3(4)1 より転載.)	4
1.6	津波避難を行うために重要だと考えるもの. (参考文献 [2] 図 3-22 より転載.)	5
2.1	平均自動車利用率とリスク値の関係. 横軸は自動車利用率(%), 縦 軸は左が津波遭遇総リスク, 右が交通事故リスクを表す. オレンジ 色のグラフは交通事故リスク, 青色のグラフは津波遭遇総リスクを 表す. (竹居, 奥村 (2017) 図 2 より転載.)	14
2.2	津波の波の深さと死亡率. 横軸が波の深さで, 縦軸が死亡率. 波の深 さが変わっても死亡率はあまり変化していないことがわかる. (H. Wang, et al. (2016) 図 8 より転載.)	15
2.3	意思決定までの時間と死亡率. 横軸が意思決定までにかかった時間 で, 縦軸が死亡率を表す. 意思決定までの時間が短いほど死亡率は 低いことがわかる. (H. Wang, et al. (2016) 図 9 より転載.) . . .	16
2.4	出発時間のばらつきと死亡率. 横軸が出発時間のばらつきで, 右に行 くほどばらつきがあることを表している. 縦軸は死亡率を表す. ば らつきが大きいほど死亡率は高いことがわかる. (H. Wang, et al. (2016) 図 10 より転載.)	16
3.1	浅瀬での水の流れを表す方程式で起こる不連続を示した図. 横軸が 位置, 縦軸が時間を表す. 図は 2 つに分かれており, 上部の図は解の 伝播を表す特性線を示し, 下部の図は方程式を解いて流れの様子を プロットしたものである. (参考文献 [3] 図 3.4 より転載.)	25

4.1	歩行者と自動車の避難のイメージ図. 横軸が距離で左が海岸線, 右が山側を表す. 避難者は左から右に向けて, 海岸線から離れるように避難する. u と v はそれぞれ歩行者と自動車の速度. 黄色く色づけた範囲で乗り捨てが行われる. (著者作成.)	28
4.2	歩行者避難のイメージ図. 横軸が距離で左が海岸線, 右が山側を表す. 避難者は左から右に向けて, 海岸線から離れるように避難する. 歩行者を赤で囲っている. (著者作成.)	29
4.3	自動車避難のイメージ図. 横軸が距離で左が海岸線, 右が山側を表す. 避難者は左から右に向けて, 海から離れるように避難する. 自動車を赤で囲っている. (著者作成.)	30
4.4	λ のイメージ図. 左は前方の車両数が多いため乗り捨てやすい様子を, 右は前方の車両が少ないため乗り捨てにくい様子を表している. オレンジが注目している車両であり, 前方とはオレンジの車両から l km 先の区間を表している. (著者作成.)	31
5.1	乗り捨て場のイメージ図. イオンモール高崎の駐車場の例. (出典元: https://www.walkerplus.com/spot/ar0310s23062/photo 最終閲覧日: 2024/11/1)	35
5.2	イオンモール白山の駐車場.	36
5.3	乗り捨てなしの場合. 上が歩行者, 下が自動車の図. 横軸は海岸からの距離 (km) で縦軸は密度 (people/km もしくは vehicle/km). 色の違いは地震発生からの時間を表しており, 凡例の通り青が 0 分後, オレンジが 7.2 分後, 緑が 14.4 分後, 赤が 21.6 分後, 紫が 28.8 分後, 茶色が 36 分後, ピンクが 43.2 分後, 灰色が 50.4 分後, 黄土色が 57.6 分後を表している. 赤の縦線は 5km の地点.	36
5.4	乗り捨て可能区間が 2.5-3km のとき. 灰色の網掛け部分は乗り捨て範囲を表す.	37
5.5	乗り捨て可能区間が 3-3.5km のとき.	37
5.6	乗り捨て可能区間が 3.5-4km のとき.	38
5.7	乗り捨て可能区間が 4-4.5km のとき.	38
5.8	乗り捨て可能区間が 4.5-5km のとき.	39
5.9	自動車の最高速度 $v_{max} = 10$ km/hour の時の乗り捨て区間と死亡者数の関係. 横軸が乗り捨て区間 (km), 縦軸が死亡者数 (人) を表す.	40
5.10	自動車の最高速度 $v_{max} = 11$ km/hour	40
5.11	自動車の最高速度 $v_{max} = 12$ km/hour	40
5.12	自動車の最高速度 $v_{max} = 13$ km/hour	40
5.13	自動車の最高速度 $v_{max} = 14$ km/hour	41
5.14	自動車の最高速度 $v_{max} = 15$ km/hour	41
5.15	自動車の最高速度 $v_{max} = 16$ km/hour	41

5.16	自動車の最高速度 $v_{max} = 17\text{km/hour}$	41
5.17	自動車の最高速度 $v_{max} = 18\text{km/hour}$	41
5.18	自動車の最高速度 $v_{max} = 19\text{km/hour}$	41
5.19	自動車の最高速度 $v_{max} = 20\text{km/hour}$	42
5.20	自動車の最高速度 $v_{max} = 40\text{km/hour}$	42
5.21	自動車の最高速度 $v_{max} = 10\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 1.5-2km . .	43
5.22	自動車の最高速度 $v_{max} = 10\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 2-2.5km . .	43
5.23	自動車の最高速度 $v_{max} = 13\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 1.5-2km . .	43
5.24	自動車の最高速度 $v_{max} = 13\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 2-2.5km . .	43
5.25	自動車の最高速度 $v_{max} = 15\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 0.5-1km . .	44
5.26	自動車の最高速度 $v_{max} = 15\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 1-1.5km . .	44
5.27	自動車の最高速度 $v_{max} = 19\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 0.5-1km . .	44
5.28	自動車の最高速度 $v_{max} = 19\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 1-1.5km . .	44
5.29	自動車の最高速度 $v_{max} = 40\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 0.5-1km . .	44
5.30	自動車の最高速度 $v_{max} = 40\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 1-1.5km . .	44
5.31	λ_0 と死亡者数の関係. 横軸が λ_0 , 縦軸が死亡者数を表す.	47
5.32	東松島市の津波浸水想定図. (参考資料 [4] より引用し, 著者が 2 つ の地図を重ねたもの.)	50
5.33	想定する避難経路 (航空自衛隊松島基地から石巻ロイヤル病院ま で). (GoogleMap より引用.)	51
5.34	東松島市の昼間人口密度. 薄いオレンジが人口密度 0-20 人/ha, 濃 いオレンジが人口密度 20-40 人/ha, 赤が人口密度 40-人/ha. (参考 ページ [5] より引用.)	52
5.35	東松島市の夜間人口密度. 黄色が人口密度 0-20 人/ha, 濃いオレンジ が人口密度 20-40 人/ha, 赤が人口密度 40-人/ha. (参考ページ [6] より引用.)	53
5.36	昼間人口密度や津波浸水状況の情報をまとめた地図. (GoogleMap より引用.)	54
5.37	夜間人口密度や津波浸水状況の情報をまとめた地図. (GoogleMap より引用.)	54
5.38	乗り捨てなしのときの, 東松島市の昼間人口分布に基づく海岸から の距離と密度の関係. 上が歩行者, 下が自動車のグラフ. グラフの色 は地震発生からの時間を表す. 赤線は津波の浸水深が 1m 以上もし くは 1m 以下のラインであり, 津波に吞まれて死亡するか否かのラ インを示す.	55
5.39	乗り捨て可能区間を 4.5-5km に設けたときの, 東松島市の昼間人口 分布に基づく海岸からの距離と密度の関係.	56
5.40	乗り捨てなしのときの, 東松島市の夜間人口分布に基づく海岸から の距離と密度の関係.	56

5.41	乗り捨て可能区間を 4.5-5km に設けたときの, 東松島市の夜間人口 分布に基づく海岸からの距離と密度の関係.	57
5.42	自動車の最高速度 v_{max} ごとの乗り捨ての有無と死亡者数の関係 (昼 間). 横軸を v_{max} , 縦軸を死亡者数としている. 青色のグラフは乗 り捨てなし, オレンジ色のグラフは乗り捨てあり (4.5-5km) を表す.	58
5.43	自動車の最高速度 v_{max} ごとの乗り捨ての有無と死亡者数の関係 (夜 間). 横軸を v_{max} , 縦軸を死亡者数としている. 青色のグラフは乗 り捨てなし, オレンジ色のグラフは乗り捨てあり (4.5-5km) を表す.	58

表 目 次

3.1	様々な差分法とその違い. (参考文献 [7] を参考に著者作成.) . . .	21
5.1	条件をシンプルにした仮想世界での計算条件	33
5.2	主な検潮所における津波の観測値. (参考文献 [8] 表 2.2-2 を一部抜 粋し著者作成.)	35
5.3	λ_0 を変化させるときの計算条件	47
5.4	宮城県東松島市の計算条件	49

第1章 研究背景

1.1 乗り捨ての定義

本研究において自動車を使い捨てるとは、自動車を用いて避難場所まで到達することを目指す人が、避難場所に到達するよりも前の地点で自動車を乗り捨てる事象をいう。乗り捨ての動機としては、渋滞、地震による道路分断等を想定している。図1.1は、本研究における「乗り捨て」のイメージ図を表したものであり、自動車に乗っている人が駐車場で車から下り、徒歩に移動手段を変更する様子を表している。



図 1.1: 乗り捨てのイメージ図. 自動車に乗っている人が駐車場で車から下り、徒歩に移動手段を変更する様子. (著者作成.)

昨今、借りた店舗とは別の店舗へレンタカーを返却するワンウェイ・レンタカーや、自宅から最寄りのバス停や駅まで自動車で行き、近くの駐車場に停めたあと、公共交通機関を用いて職場まで行くパークアンドライドなどが普及し始めている。後者については、中心部の渋滞緩和や、環境負荷軽減に寄与するため、多くの市町村が積極的に取り入れている。例えば石川県金沢市でも金沢市パーク・アンド・ライド駐車場が東金沢駅や森本駅などに設置済みである [9]。このように、乗り捨てという方法はその便利さと問題解決力の高さから、様々な場面に活用され、普及されつつある。

1.2 地震・津波避難の現状

1.2.1 内閣府と気仙沼市による調査結果

津波避難時には多くの人が自動車を使用している。実際に、避難場所への移動手段について問うた内閣府の調査（参考文献 [1]）によると東日本大震災時に最初

の避難場所まで徒歩で移動した人が全体の 4 割強、自動車で移動した人が 5 割強という結果であった（図 1.2）。そして、上述した 5 割強の人間が自動車で避難した際に困ったこととして最も挙げていた事項が「渋滞」であり、その割合は 3 割強であった（図 1.3）。これは、「困ったことは特になかった」を除き、他の事項と 10%以上の差をつけての 1 位であり、多くの人が渋滞に困っていたことがわかる。

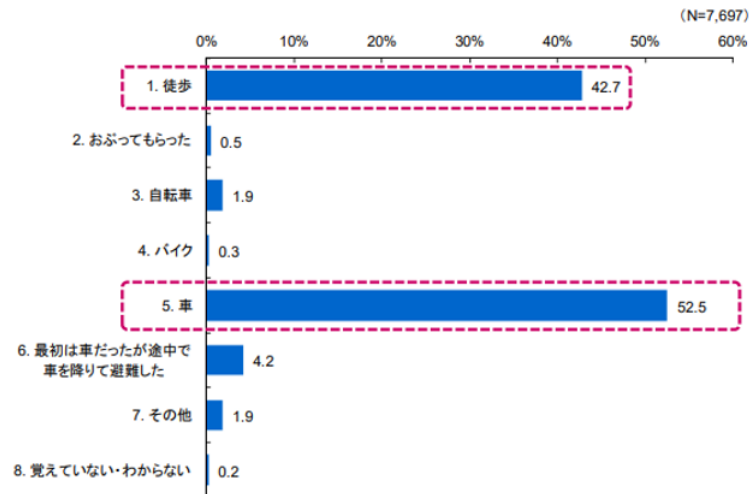


図 1.2: 避難場所への移動手段. 徒歩で移動した人が全体の 4 割強、自動車で移動した人が 5 割強であった。（参考文献 [1]p64 より転載.）

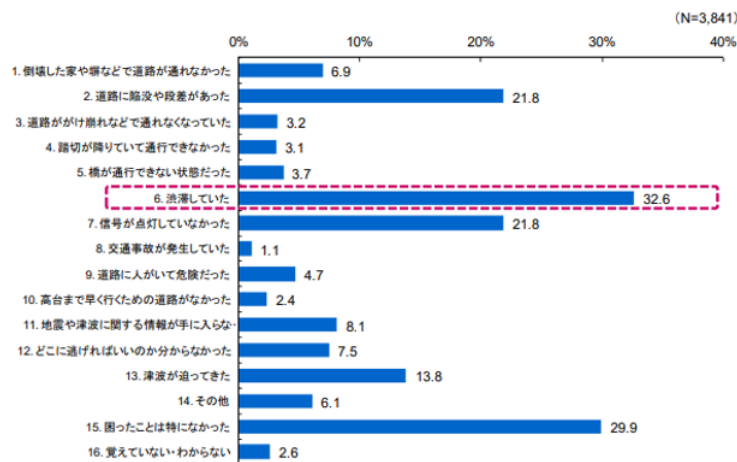


図 1.3: 車で避難した際に困ったこと. 3 割強の人が「渋滞」と回答。（参考文献 [1]p67 より転載.）

また、奥村（2018）[2]には気仙沼市で平成 25 年に行った「津波避難等に関する市民アンケート調査」の結果について記載があるが、2024/10/3 時点では気仙沼市アンケート結果の Web ページが閲覧不可能な状態であったため、奥村（2018）[2]

からアンケート結果を抜粋している。図 1.4 はその中でも避難途中の状況についての結果を抜粋したもので「車が渋滞していた」が37%で最も多く、他にも「人と車が混在していて危険だった」「車を乗り捨てようと思ったが場所がなかった」「交通事故があった」などが挙げられていた。このアンケートからは、自動車を乗り捨てようとしたができなかった人たちが少なからず存在したことがわかる。

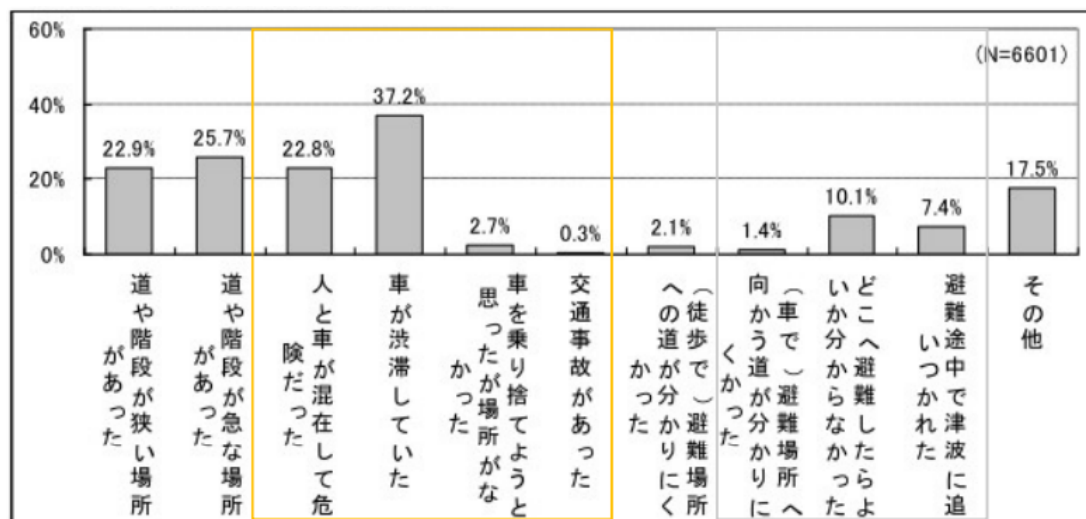


図 1.4: 避難途中の状況. (参考文献 [2] 図 3-22 より転載.)

そのほかにも液状化や地割れ、道路しか通れないため自由度が制限される等、自動車避難には様々な危険性がある。また、東日本大震災発生時、岩手県ではグリッドロックと言われる超渋滞現象が起こっており、自動車が全く動かない地域も存在した。

このように、自動車避難に多くの危険性があるながらも、気仙沼市を対象に行ったアンケートによると、今後想定する避難手段は以下の図 1.5 のような結果であった。この図によると徒歩で避難する予定と答えた人は約 5 割、自動車で避難する予定と答えた人は約 4.5 割と、多少は減ったものの、依然として多くの人が自動車で避難する予定だということがわかる。

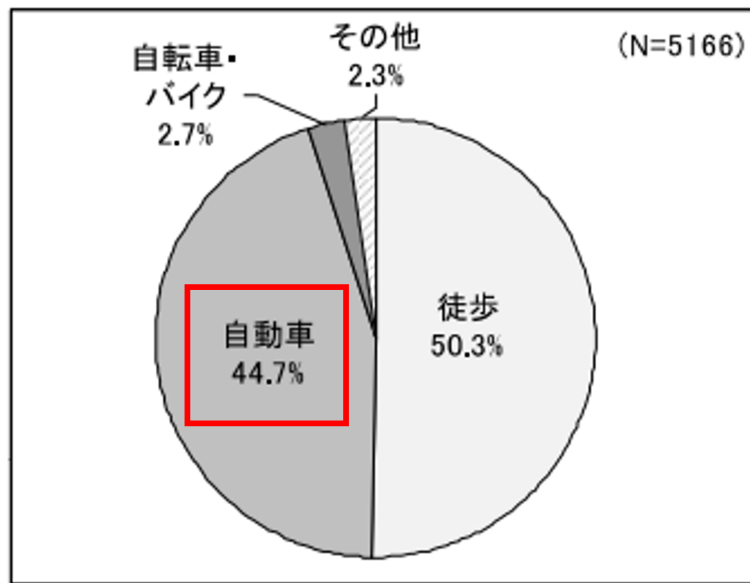


図 1.5: 今後想定する避難手段. (参考文献 [2] 問 3(4)1 より転載.)

また, 同アンケートの別の問い「津波避難を行うために重要だと思うもの」(図 1.6) に関しては, 1 位が約 64%で「高台や避難場所へ誘導する標識の設置」であり, 続いて 2 位が 56%で「車避難のための従来より広い道路の整備」であった. 多くの人が自動車での避難を希望する中, やはり避難のための道路整備は重要事項だということがわかる. また, 自動車避難によって助かった人もいたことから, 自動車避難が危険だからやめようという考えよりも, 道路整備などにより, どうすれば安全に自動車避難ができるのかにフォーカスすることも大事である.

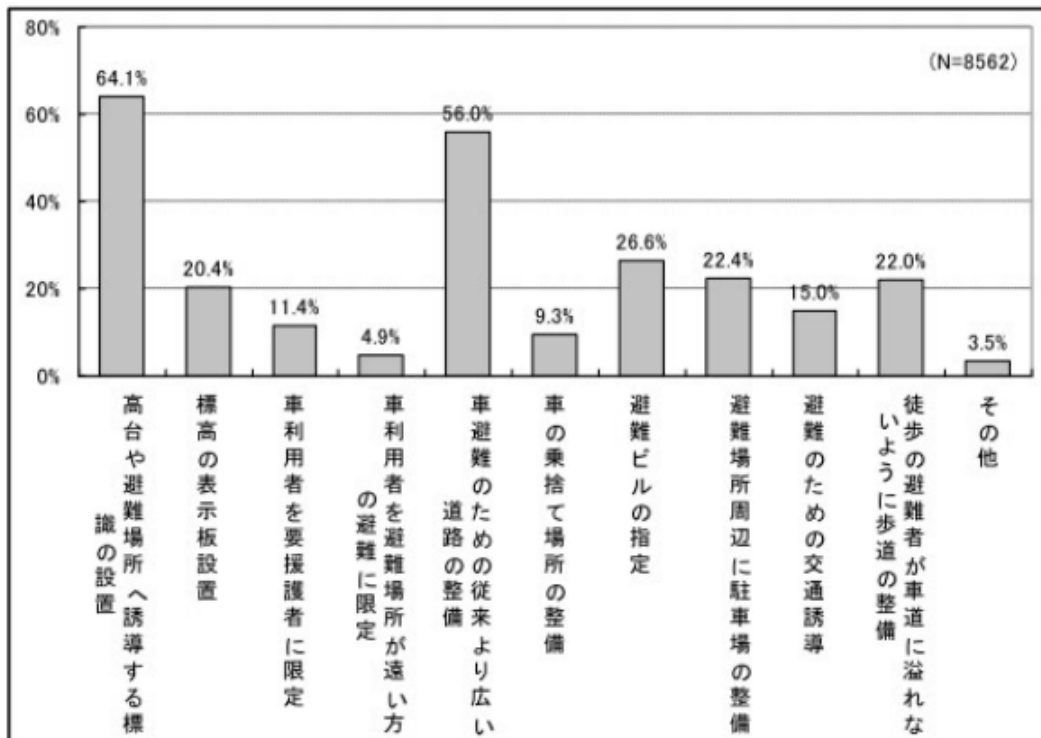


図 1.6: 津波避難を行うために重要だと考えるもの。（参考文献 [2] 図 3-22 より転載。）

1.2.2 小括

東日本大震災を踏まえたアンケート結果によると、多くの人が自動車で避難したことに加え、自動車避難には渋滞などの危険が多く存在しており、実際に自動車で避難した人もそういった危険を感じていたことが明らかになった。一方で、危険性を認識しつつもなお、今後も自動車で避難したいと答えた人が多く、津波避難と自動車は切り離せない存在であることがわかる。また、自動車避難で助かった人もいたことや、自動車避難のための道路整備が求められていることから、安全な自動車避難のための道路整備はとても大切だということがわかる。

1.3 避難ルール現状

震災時、自動車避難は渋滞などで混乱を招くことから、基本的に徒歩避難が推奨されていた。しかし東日本大震災を経て、原則は徒歩避難としつつも自動車避難のあり方が検討されている [10]。具体的には、沿岸地域に限り自動車避難を容認したり、道路利用ルールの整理を行ったりするなどである。実際に、東北地方の各市町

では津波避難計画の改訂が行われており、自動車による避難方法の検討が行われている地域もある。たとえば青森県八戸市では、歩行困難者が避難する場合や、想定される津波に対して徒歩で避難が可能な距離に適切な避難場所がない場合などにおいて、地域の実情に応じた自動車避難方法を検討している [11]。

1.4 自動車避難についての意見

自動車避難に関して、関谷（2012） [12] は自動車での避難が危険を伴う一方で、車を利用しなければ避難が間に合わなかったと考えられる人も多く存在したという現状を踏まえ、車社会を前提に安全に避難や移動が可能な街づくりを進める必要があると述べている。また、緊急時に自動車を放棄できるよう、道路付近に側道やオープンスペースといった自動車を一時的に置ける場所を整備することが重要であると指摘している。大阪府や東京都などの大都市を除いて、生活する上で自動車が必要な都市がほとんどであり、自動車に乗っているときに地震や津波が発生する可能性も大いにあるため、自動車社会を前提とした避難方法についての議論は大切である。加えて、関谷は論文中で避難の課題を防災意識にもっていく日本の悪い習慣があると述べている。関谷（2012）では日本の防災対策の課題を洗い出して解決しようとはせず、現状維持にもっていつている点に言及しており、現状に対して、科学実証的に向き合う必要性を述べている。

1.5 本研究の目的

避難手段については、適切な数の自動車避難が津波遭遇リスクを低くするという竹居・奥村（2018） [13] による研究結果や、実際に自動車による避難で助かった事例もあることから、計画次第では、自動車避難は多くの命を救う可能性があると考えられる。また、アンケートで明らかになった「自動車で避難したい人が依然として多い」という現状を踏まえ、自動車での避難者数を減らすのではなく、自動車での避難者数を減らさずにより多くの命を救う方向性を取ることが重要である。その点で、関谷（2012） [12] で述べられている、車社会を前提にという考えはとても大切な事項である。とはいえ、自動車避難には渋滞など危険はつきものであるため、自動車と徒歩のメリット・デメリットを考慮して避難手段を臨機応変に選択することは重要である。

以上を踏まえ、本研究では、自動車と徒歩の両方のメリットを生かすことができることに加え、自動車避難者数を減らさないという観点で“自動車乗り捨て”に着目する。本研究の目的は、津波避難時に自動車乗り捨てが有効かどうかを明らかにすることである。その過程でパラメータを変え、結果にどのように影響するのかを比較検討することも目的とする。

1.6 本研究の意義

本研究は、地方自治体などが行う、自動車避難を加味した適切な避難計画策定の一助になりうるという意義を有する。もし自動車乗り捨てが津波避難の際に有効だということが明らかになれば、自動車乗り捨てが新しい避難手段に加わり、多くの命を救う可能性があるだけでなく、その時の駐車場の位置などの条件を元に、乗り捨てができる駐車場の設置や路肩を設置し、災害に強いまちづくりを行うことができる。つまり、多くの自動車避難者が重要だと感じていた自動車避難のための道路整備につながる。また、乗り捨て場として、イオンモールなどの広い駐車場を持つ施設を指定することで、普段は賑わいのあるまちづくりに寄与しながら、防災力強化も図れ、石川県も取り組んでいる都市構造再編集中支援事業 [14] にもつながると考えている。都市構造再編集中支援事業とは、「立地適正化計画」に基づき、地方自治体や民間企業が都市機能の向上や住みやすい環境づくりを目指して、公共施設の防災力などを強化し、持続可能で強靱な都市を目指す取り組みを指す [15]。

1.7 本論文の構成

本稿は大きく分けて先行研究レビュー・離散化方法・提案モデル・シミュレーション結果の区分で構成される。第2章では先行研究を元に交通流を表現するモデルの紹介をした後に、自動車避難についての先行研究レビューを行う。第3章ではモデルをコンピュータで計算する際に必要な離散化方法について紹介する。第4章では、第2章で紹介したモデルを参考に自動車乗り捨てを表現する数理モデルを提案する。第5章では第4章で構築した数理モデルを様々な条件で適用し、シミュレーションを行った結果を述べる。最後に第6章では、まとめと今後の展望について示す。

第2章 関連研究

本章では先行研究をレビューする。先行研究は大きく分けて2種類に分け、1つはモデル化の手法について、もう1つは本研究に関連する先行研究結果とその課題について言及する。災害時の自動車乗り捨てに直接関連している先行研究は、調べた限りでは存在しなかったが、自動車避難の有効性を示した先行研究は存在しているためそれらを紹介する。

2.1 研究方法に着目した先行研究レビュー

本節では交通流モデルについて書かれた参考文献 [16] を元に、様々な交通流モデルについて紹介する。交通流モデルは1つ、現実をどのように表現するか、2つ数学的構造、3つ概念的側面によって分類される。まずは、現実をどのように表現するかという点に焦点を当てたときに分けられる3種類のモデル（マクロモデル・ミクロモデル・メソスコピックモデル）を述べる。次に、数学的構造で分類したもの（偏微分方程式・連立常微分方程式・連立反復写像・セルオートマトン・離散的な状態変数と連続的な時間の組み合わせ・静的モデル）について詳しく説明する。

2.1.1 現実をどのように表現するかという視点での分類

1. マクロモデル

マクロモデルでは、交通流を運動する液体や気体と同様に記述する。そのため、このモデルは「流体力学モデル」とも呼ばれる。動的変数としては交通密度 $\rho(x, t)$ 、流量 $Q(x, t)$ 、平均速度 $V(x, t)$ などがあり、渋滞領域の変化や交通波の伝播速度など、集団的な現象を記述することができる。

このマクロモデルが有用な場合は

- 細かい効果を考慮する必要がない場合（例：車線変更、ドライバーや車両個々の性質）
- 巨視的な量にのみ関心がある場合
- シミュレーションの計算時間をなるべく短縮したい場合（例：リアルタイムにシミュレーションすることが求められるアプリケーションなど）

ただし、近年はコンピュータの性能向上によりこの点はあまり重要ではなくなりつつある。）

- 入力データが不連続だったり、データの性質が異なっていたりして、データの統合が必要な場合

の4点である。

2. ミクロモデル

ミクロモデルには、車両追従モデルやセルオートマトンが含まれ、周囲の交通状況に応じた各運転者の反応（加速、減速、車線変更など）を記述する。ドライバーと車両を粒子として捉え、これらが集合して交通流を形成する。動変数としては、車両の位置 $x_a(t)$ 、速度 $v_a(t)$ 、加速度 $v'_a(t)$ がある。

このミクロモデルが有用な場合は

- 交通制限等の様々な交通状況を考慮する場合（例：トラックの速度制限や追い越し禁止の影響をシミュレーションする場合）
- 人間の運転スタイルを考慮する場合（推測誤差、反応時間、不注意、予測など）
- 様々な交通手段間での相互作用を考慮する場合（車、トラック、バス、自転車、歩行者など）
- 自動運転技術
 - － Adaptive Cruise Control (ACC)：クルマに搭載した専用のセンサーとコンピューターを用いたシステムが、アクセル操作とブレーキ操作の両方を自動的に行ない、運転を支援する機能。前走車がいる場合、センサーがそれを検知し車間距離を一定に保ちながら走る「追従走行」が可能。また前走車がない場合は、ドライバーが任意に設定した速度を維持して走ることができる [17]。
 - － Intelligent Transport Systems (ITS)：最先端の情報通信技術を用いて人と道路と車両とを情報でネットワークすることにより、交通事故、渋滞等といった道路交通問題の解決を目的に構築する新しい交通システム [18]。
 - － 他にも日産自動車の次世代技術で、リアル（現実）とバーチャル（仮想）の世界を融合した3D インターフェースを通じてドライバーに見えないものを可視化する Invisible-to-Visible (I2V) や、車両間で通信を行う Vehicle to Vehicle (V2V) などがある。

3. メソスコピックモデル

メソスコピックモデルとは、マクロモデルとミクロモデルを組み合わせたハイブリットモデルである。このモデルの中には様々な種類があるが、以下には代表的なもののみをいくつか取り上げる。

- 局所場モデル：周囲の交通状況が各車両の動きに影響を与えるモデル。（マクロ→ミクロ）
- マスター方程式：各車両の動きが周囲の交通状況に影響を与えるモデル。（ミクロ→マクロ）（例：車両数が交通渋滞に影響を与える）
- ガス動力学的交通モデル：各車両の動きをガスの分子の振る舞いに類似して捉えるモデル。ガスの分子同士の衝突を、車両同士の衝突に置き換えて、車両同士が接触して車両の速度や進行方向が変化すると考える。
- 並列ハイブリッドモデル：交通ネットワークの重要な部分（交差点や信号機など）をミクロに扱い、その他の部分はマクロに扱うモデル。

2.1.2 数学的構造での分類

1. 偏微分方程式（PDE）

位置 x と時間 t がどちらも連続量（途切れなく変わる数値）であり、局所速度 $V(x, t)$ や密度 $\rho(x, t)$ は、この位置 x と時間 t によって決定する。マクロモデルやガス動力学的交通モデルを記述するのに適している。また、PDE を使用した交通流モデルでは、定常状態（交通の状況が時間とともに変化しない安定した状態）の解析解（速度や密度の関係性を計算や数式で解いた解）や、交通波の伝播速度、安定性特性（渋滞や波が発生したときにそれが増幅するか収束するかを示す特性）を得ることができる。さらに、このモデルは数学的に複雑であるが、高速で数値解を得ることができるという特徴をもつ。

交通流モデルに用いられる偏微分方程式として移流方程式がある。以下、移流方程式について説明した後、移流方程式を用いた交通流モデルを紹介する。

移流方程式とは、空間1階微分を含む時間発展方程式のことであり、物質量が流れに沿って移動する様子を表す（式 (2.1)） [19]。 q は、空間の密度や圧力などを表し、 x と t の式として表される（式 (2.2)）。 c は流れの速さを表す。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

$$q = q(x, t) \quad (2.2)$$

移流方程式を交通流モデルで適用する際は, q を道路上の車両密度とし, 時間経過に従って自動車が行進方向に動く様子を表す. 初めに基本的なモデルについて紹介し, その後よりデータにフィットしたモデルについて紹介する.

参考文献 [3] によると, 基本的な移流方程式を用いた交通流モデルは

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

$$u(\rho) = u_m \left(1 - \frac{\rho}{\rho_m} \right) \quad (2.4)$$

で表される. 式 2.3 は高速道路での自動車の流れを表したもので, ρ は自動車の密度を表しており, 単位は台/km である. ρ_m は渋滞が形成されたあとの密度の最大値, u_m は自動車の最大速度 (km/hour) である. u は自動車の速度であり, $[0, \rho_m]$ の間で変化する ρ に応じて決まる (式 2.4). 式 2.4 は, もっとも簡単な線形の関係を表す式であり, 密度の増加に伴い, 速度が落ちるようになっている.

参考文献 [20] によると, Harold Greenberg (1959) [21] に記載されている数式がよりデータにフィットしていると述べられている. Harold Greenberg (1959) に記載の数式は以下の通りである.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

$$u(\rho) = u_m \log \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \quad (2.6)$$

式 2.5 と式 2.6 に使われている文字の意味は式 2.3 と式 2.4 に使われている文字の意味と同じである. 自動車 u の速度を表す式が異なっており, 線形ではなく対数方程式になっている.

以上が移流方程式を用いた基本的な交通流モデルとよりデータにフィットしたモデルである. 上で紹介した 2 つのモデルは, 自動車の速度 $u(\rho)$ がどちらもその場の密度のみがその時の速度に影響するようになっている. しかし, 実際には, 私たちは前方の情報をもとに, 例えば, 先が渋滞していたら速度を落とし, 先が空いていたら速度を上げるなどするはずである. 本研究では詳しい数式の紹介は省略するが, そのような, 前の自動車との相互作用を踏まえたモデルが, Yi Sun, Changhui Tan (2020) [22], Yi Sun, Changhui Tan (2023) [23] に記載されている.

2. 連立常微分方程式

車両 α の、局所速度 $v_\alpha(t)$ や位置 $x_\alpha(t)$ が、時間 t という 1 つの変数にのみ依存する。ミクロモデルを記述するのに適している。連立微分方程式を使ったモデルは、時間が経つごとに $v_\alpha(t)$ や $x_\alpha(t)$ がどのように変化するかという時間微分を含むということと、車両は前を走る車両の位置や速度に影響されるため、先行車の方程式と連立するという特徴がある。

3. 連立反復写像

時間 t が離散で、時間ステップ Δt ごとに状態を更新するモデル。偏微分方程式の数値計算の仕方と形式的には同じであるが、時間ステップ Δt が、連立反復写像はモデルのパラメータである一方で、偏微分方程式は数値計算手法の補助変数であるという、概念的な部分が異なる。マクロモデルとミクロモデル、どちらにも使用される。

4. セルオートマトン

すべての変数が離散的。空間はセルに分割され、時間は一定の間隔で更新される。各セルの状態は 0（車両なし）か 1（車両あり）で表される。各時刻のセルの占有状態は前の時刻の占有状態に基づいて決定する。主にミクロモデルに使用される。

5. 離散的な状態変数と連続的な時間の組み合わせ

車線変更を行う車両を扱うときに用いる。車線を 1 や 2 といった離散的に表し、時間を連続した変数として表す。個々の車両の詳細ではなく、車両集団の確率的な挙動や遷移を扱うマスター方程式などで用いられる。例えば、ある車線から別の車線へ、車両がどの割合で移るかといった車線変更の確率的な記述に使われる。

6. 静的モデル

ある瞬間の速度と密度の関係や、流量と密度の関係などを示すものであり、時間による変化を考慮しないもの。動的モデルの定常状態としてみることもできる。流量と速度の関係を用いてある特定の交通状態での推奨ルートを算出する、経路選択に用いられることもある。

2.1.3 小括

自動車乗り捨てに関する研究がないため、本研究では、まずは自動車乗り捨てが津波避難時における生存者を増やす有効な手段なのかを概算することを目指している。細かい効果はさておき、巨視的な量にのみ関心があるためマクロモデルのモデルを構築することとする。また、マクロモデルの記述に適しているということで、偏微分方程式の中でも移流方程式でモデルを記述する。

2.2 研究内容に着目した先行研究レビュー

本節では、先行研究レビューの中でも、研究の内容に着目してピックアップしたものを紹介する。自動車の乗り捨てに関する先行研究は私が調べた限りではなかったが、歩車混合のモデルから明らかになったことや、今後の展望として自動車乗り捨てを考慮したモデルを挙げている研究などを紹介する。

2.2.1 歩車混合を考慮した最適津波避難モデル（竹居, 奥村（2017））

竹居, 奥村（2017）[24]では、歩車混合を考慮したセルベースの最適津波避難モデルについて述べられている。目的は歩車混合の影響を組み入れたセルベースの最適津波避難モデルを提案すること、実際の市町村に適用して自動車利用率と津波遭遇リスク・交通事故リスクの関係、歩車混合時のネットワークの使い方の違い、交通事故リスクの高い場所と時刻の分析を行うことである。

この研究で用いられているモデルは線形計画問題となっており、目的関数が津波遭遇リスク、制約関数が自動車避難者と徒歩避難者の交通量もしくは人数の保存則、セルへの流入流出制限、速度制限などとなっている。

目的関数である全避難者の津波遭遇リスクとは、各時刻に各セルに存在する人数とその時刻の津波遭遇リスクをかけた値の総和を、時刻数で割って平均化したものである。ある時刻のあるセルにおける津波遭遇リスクの値は、その地域で発生する可能性のある複数のパターンの津波に対する浸水シミュレーション等を参考に、0～1の値を、不確実性を考慮した上で与えている。

交通事故リスクについては、自動車が追い抜いた歩行者の数に比例すると考え、全期間、全地域について自動車が追い抜いた歩行者の数を足し合わせたものによって表現している。なお、交通事故リスクは目的関数や制約条件に加えるのではなく、出てきた線形計画問題の最適解に対して個別に算出している。

この研究では、宮城県亘理郡亘理町を対象とし、この町の津波避難計画をもとに必要値を設定している。その結果得られた平均自動車利用率と津波遭遇総リスクもしくは交通事故リスクの関係図は以下である（図 2.1）。

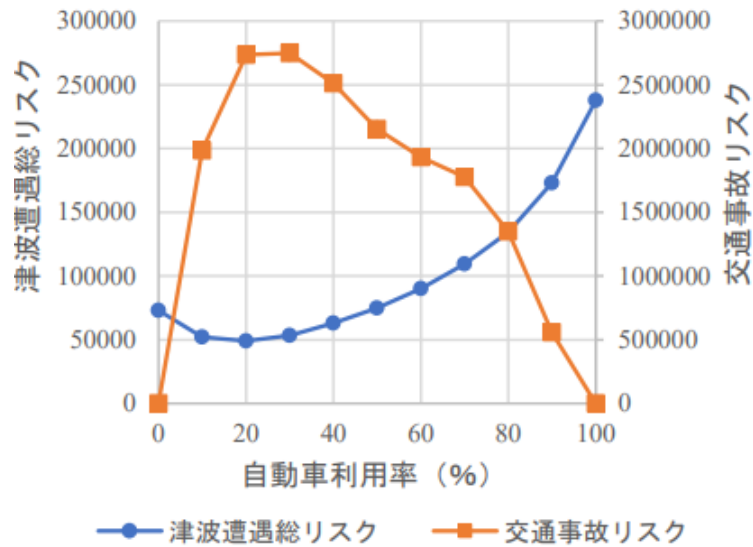


図 2.1: 平均自動車利用率とリスク値の関係. 横軸は自動車利用率 (%), 縦軸は左が津波遭遇総リスク, 右が交通事故リスクを表す. オレンジ色のグラフは交通事故リスク, 青色のグラフは津波遭遇総リスクを表す. (竹居, 奥村 (2017) 図 2 より転載.)

津波遭遇総リスクに着目すると, 自動車の利用率が0%のときより, 20%のときの方が津波遭遇リスクが小さいという結果であった. また, 交通事故リスクは自動車利用率が20%の時に一番高く, それ以上に自動車利用率が高くなると交通事故リスクは小さくなるという結果であった. そのため津波避難において自動車利用を認めるとしても徒歩避難を基本とし, 自動車の利用率の上限値を守る必要があると述べている.

次に, ネットワークの利用形態を比較するため, 以下の3つの条件で検討を行った: ① 全員が歩行者の場合, ② 津波遭遇リスクが最小となる自動車利用率20%の場合, ③ 全員が自動車利用の場合.

① 全員が歩行者の場合, 交通は主に東西を結ぶ道路や内陸部を縦断する道路に集中し, 西側の遠方地域にも多くの避難者が集まっていた.

③ 全員が自動車を利用する場合, ①と同様に中央部の東西方向の道路や内陸部を縦断する道路が主に使われていたが, 混雑を避けるため地域全体の道路がより広範囲に活用されていた.

②の自動車利用率が20%の場合では, 歩行者は最短経路を中心に道路を利用していたが, ①に比べて海に近い東側では自動車が利用されるため, 歩行者の交通量が減少していた. 一方, 自動車は遠回りを含むさまざまな経路に分散して利用されていたが, 歩行者が集中する主要な2本の道路はほとんど使われていなかった. これは, 歩行者と自動車が同じセルを同時に利用すると流れが制約されるため, 最短経路を歩行者に優先させた結果と考えられる.

さらに、交通事故リスクを減らすには、歩行者が避難を終えた後で出発地域を確認し、残った人々を自動車に乗せて避難する方法が有効であると述べられている。

2.2.2 エージェントベースモデルに基づく、津波避難時の避難手段や意思決定と死亡率の関係（H. Wang ら（2016））

H. Wang ら（2016）[25] の目的は、オレゴン州のシーサイドを事例として、意思決定時間の変動や交通手段の選択が、沿岸地域の住民の安全（死亡率）にどのように影響するかを検証することである。エージェントベースモデルを用いて、

1. 津波の波の深さと死亡率
2. 意思決定時間に対する死亡率
3. 避難手段の選択（徒歩での避難・自動車での避難・それらと高台への避難を組み合わせた避難）に対する死亡率

をシミュレーションしている。ただし、地震による道路、橋、建物への損害はなく、エージェント同士はお互いの行動に影響されないと仮定している。

結果としては、それぞれ

1. 人が流されやすくなったり致命的な危険にさらされる深さである臨界深度は、シミュレーション結果にあまり大きな影響を与えなかった。以下の図 2.2 は津波の波の深さと死亡率の関係を表したもので、横軸が波の深さ、縦軸が死亡率を表す。

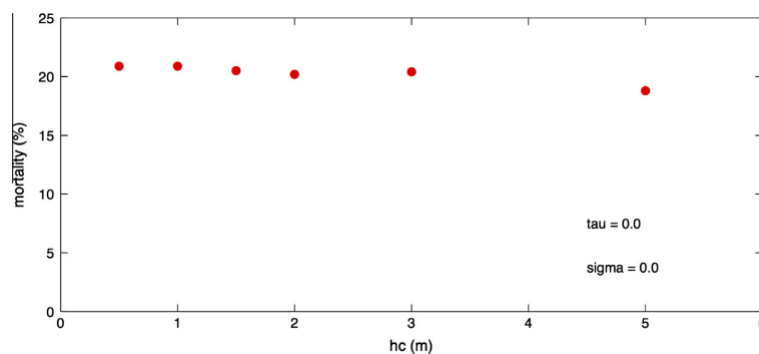


図 2.2: 津波の波の深さと死亡率. 横軸が波の深さで、縦軸が死亡率. 波の深さが変わっても死亡率はあまり変化していないことがわかる。（H. Wang, et al. (2016) 図 8 より転載。）

2. 意思決定が遅くなると死亡率が大きく上昇したことから、意思決定までの時間は死亡率に大きく影響を与えている。また、人々の出発時間にばらつきがあればあるほど、死亡率は増加した。図 2.3 は意思決定までの時間と死亡率を表しており、横軸が意思決定までにかかった時間、縦軸が死亡率を表す。また、図 2.4 は出発時間のばらつきと死亡率の関係を表しており、横軸が出発時間のばらつき、縦軸は死亡率を表している。右に行けば行くほど出発時間にばらつきがあることを表す。

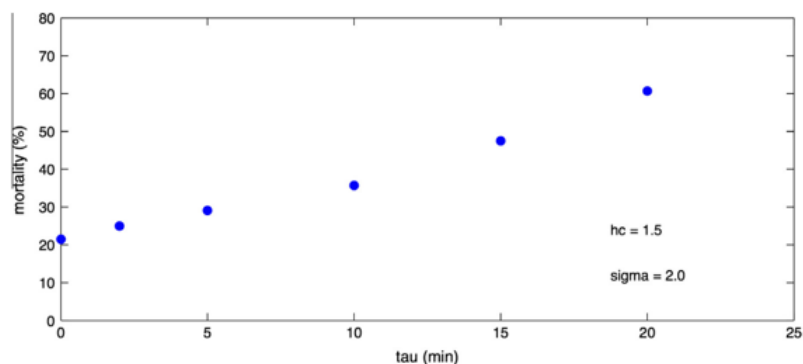


図 2.3: 意思決定までの時間と死亡率. 横軸が意思決定までにかかった時間で、縦軸が死亡率を表す。意思決定までの時間が短いほど死亡率は低いことがわかる。(H. Wang, et al. (2016) 図 9 より転載.)

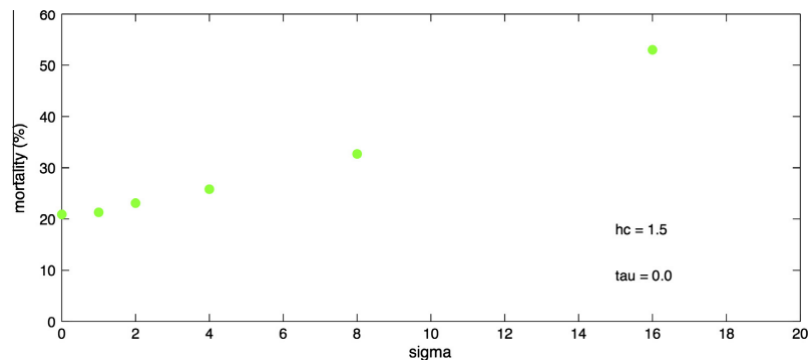


図 2.4: 出発時間のばらつきと死亡率. 横軸が出発時間のばらつきで、右に行くほどばらつきがあることを表している。縦軸は死亡率を表す。ばらつきが大きいほど死亡率は高いことがわかる。(H. Wang, et al. (2016) 図 10 より転載.)

3. 避難手段の選択と死亡率に関して、徒歩避難者は避難速度が早ければ早いほど死亡率は低くなるが、避難速度のばらつきの範囲が広いと死亡率が大きく増加した。自動車避難者が増えると渋滞により死亡率は大幅に増加した。ま

た高台（高さのあるビル）への避難は死亡率が大きく低下することが明らかになった。

この研究では、今後の課題として、最初に自動車で避難を開始したが渋滞の中で自動車を乗り捨て、徒歩での避難に切り替えた場合のシミュレーションと評価を行うことを挙げているが、まだ行われていない。

2.2.3 エージェントベースモデルに基づく津波避難シミュレーションとリスク評価（Z. Wang, G. Jia（2021））

Z. Wang, G. Jia（2021）[26]では、津波避難における要素を考慮したより現実的なエージェントベースモデルの津波避難モデルを提案し、シミュレーションとリスク評価を行った。具体的には、道路や橋への被害や、歩行者と自動車の相互作用、歩行速度のばらつき、歩行者の速度調整等を組み込んだモデルである。論文内ではオレゴン州のシーサイドにモデルを適用した場合の結果が述べられており、地震の被害や歩行者の速度の調節を加味しないと、避難リスクが過小評価されることがわかった。この研究内での避難リスクとは、死亡率の期待値のことである。また、人口の規模や、歩行者と自動車の相互作用の有無によっても避難リスクが過小評価もしくは過大評価される可能性があることも明らかになった。

論文内では、エージェントベースモデルの一部を改良することで乗り捨てを考慮できると述べられているが、現在（2024年12月7日）までの彼らの論文を見たところまだ行われていない。

2.2.4 小括

竹居、奥村（2017）では、自動車から徒歩へのモードの切り替えは許可しない＝自動車乗り捨てを許さないという制約条件を付けているため、乗り捨ては考慮されていない。しかし図2.1から、交通事故リスクを低くするために自動車利用率をなるべく高くした上で、津波遭遇総リスクを低く抑えることができるのならば、それが一番理想であると読み取れる。そのための案として、自動車乗り捨てが、交通事故リスクと津波遭遇総リスクを低くするための手段になりうるのではないかと考える。

また、これまでの研究で、マクロモデルがベースとなった乗り捨てモデルに関する研究はない。またミクロモデルがベースとなった研究でも今後の課題として乗り捨てを取り上げているだけでまだ行われていない。そのため、本研究で構築する津波避難モデルに自動車乗り捨てが表現されている点で新規性があると言える。

第3章 離散化方法

本節ではいくつかの離散化方法について紹介する。コンピュータは今回の交通流を表すモデルのような微分方程式をそのまま計算することはできず、連続的な関数は有限な点で近似する必要がある。その方法が離散化方法であるが、細かく分けると種類が多く、また今回のモデルの基礎となる移流方程式を離散化する方法についても詳しく述べたいため、独立した章にしている。離散化には大きく分けて有限差分法、有限体積法、有限要素法の3つがある。まずは有限差分法について、差分法の基礎について示された web ページ（参考ページ [7]）と、流体力学の数値計算法について書かれた本（参考文献 [19]）を参考に説明する。その後、有限体積法について説明する。有限要素法は空間表現に柔軟性がある点が強みであるが、本論文では割愛する。

線形移流方程式は精度と安定性が保たれやすいので、有限差分法などシンプルな離散化方法が使われるが、非線形移流方程式では、不連続や振動を防ぐために有限体積法など高精度な方法が使われることが多い。

3.1 有限差分法

3.1.1 差分法の基本

まずは、移流方程式ではなく、空間微分

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{q(x + \Delta x) - q(x)}{\Delta x}$$

を、差分法で離散化することを考える。

差分法の中でも種類があり、1つ目に紹介するのは前進差分である。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial q}{\partial x} \right)_i &= \frac{q(x_i + \Delta x) - q(x_i)}{\Delta x} \\ &= \frac{q_{i+1} - q_i}{\Delta x} \end{aligned}$$

$$\text{※ } x_{i+1} = x_i + \Delta x$$

以上のように、ある地点とある地点から見て前よりの地点（その次の地点）の値を用いる差分法を前進差分という。

前進差分の誤差については, $q(x_i + \Delta x)$ の部分をテイラー展開して全体を見ると,

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\partial q}{\partial x} \right)_i &= \frac{q(x_i + \Delta x) - q(x_i)}{\Delta x} \\
 &= \frac{1}{\Delta x} \left(q(x_i) + \Delta x \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2!} \frac{\partial^2 q(x_i)}{\partial x^2} + \cdots - q(x_i) \right) \\
 &= \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} + \frac{\Delta x}{2!} \frac{\partial^2 q(x_i)}{\partial x^2} + \mathcal{O}(\Delta x^2) \\
 &= \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} + \mathcal{O}(\Delta x) \\
 &= \frac{q_{i+x} - q_i}{\Delta x} + \mathcal{O}(\Delta x)
 \end{aligned}$$

となり, 誤差が Δx の 1 次 に比例することがわかる. このとき, これを 1 次精度近似といい, この数字が大きければ大きいほど精度がいいことを意味する.

2 つ目は後退差分である.

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\partial q}{\partial x} \right)_i &= \frac{q(x_i) - q(x_i - \Delta x)}{\Delta x} \\
 &= \frac{q_i - q_{i-1}}{\Delta x}
 \end{aligned}$$

以上のように, ある地点とある地点から見て後ろの地点 (その 1 つ前の地点) 値の差を用いる差分法を後退差分という.

誤差は,

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{\partial q}{\partial x} \right)_i &= \frac{q(x_i) - q(x_i - \Delta x)}{\Delta x} \\
 &= \frac{1}{\Delta x} \left(q(x_i) - \left(q(x_i) + (-\Delta x) \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} + \frac{(-\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 q(x_i)}{\partial x^2} + \frac{(-\Delta x)^3}{3!} \frac{\partial^3 q(x_i)}{\partial x^3} + \cdots \right) \right) \\
 &= \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} - \frac{\Delta x}{2!} \frac{\partial^2 q(x_i)}{\partial x^2} + \mathcal{O}(\Delta x^2) \\
 &= \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} + \mathcal{O}(\Delta x) \\
 &= \frac{q_i - q_{i-1}}{\Delta x} + \mathcal{O}(\Delta x)
 \end{aligned}$$

となり, 前進差分と同じ 1 次精度近似である.

3 つ目は中心差分である. 中心差分はある地点の両隣の値を用いて計算する差分法である.

$$\left(\frac{\partial q}{\partial x} \right)_i = \frac{q_{i+1} - q_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.1)$$

誤差は,

$$\begin{aligned}
\left(\frac{\partial q}{\partial x}\right)_i &= \frac{q(x_i + \Delta x) - q(x_i - \Delta x)}{2\Delta x} \\
&= \frac{1}{2\Delta x} \left\{ \left(q(x_i) + \Delta x \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2!} \frac{\partial^2 q(x_i)}{\partial x^2} + \frac{\Delta x^3}{3!} \frac{\partial^3 q(x_i)}{\partial x^3} + \dots \right) \right. \\
&\quad \left. - \left(q(x_i) + (-\Delta x) \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} + \frac{(-\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 q(x_i)}{\partial x^2} + \frac{(-\Delta x)^3}{3!} \frac{\partial^3 q(x_i)}{\partial x^3} + \dots \right) \right\} \\
&= \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{3!} \frac{\partial^3 q(x_i)}{\partial x^3} + \mathcal{O}(\Delta x^4) \\
&= \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} + \mathcal{O}(\Delta x^2) \\
&= \frac{q_{i+1} - q_{i-1}}{2\Delta x} + \mathcal{O}(\Delta x^2)
\end{aligned}$$

以上より誤差は Δ の 2 次 に比例するため, 2 次精度近似である.

ここまで 1 階微分について言及してきたが, 最後に 2 階微分

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x^2}$$

を, 隣接する点 $q(x_{i+1})$ と $q(x_{i-1})$ を用いた中心差分による近似について述べる. まず $q(x_{i+1})$ と $q(x_{i-1})$ をテイラー展開すると,

$$\begin{aligned}
q(x_{i+1}) &= q(x_i) + \Delta x \\
&= q(x_i) + \Delta x \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} + \frac{\Delta x^2}{2!} \frac{\partial^2 q(x_i)}{\partial x^2} + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{\partial^3 q(x_i)}{\partial x^3} + \dots
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
q(x_{i-1}) &= q(x_i) - \Delta x \\
&= q(x_i) + (-\Delta x) \frac{\partial q(x_i)}{\partial x} + \frac{(-\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 q(x_i)}{\partial x^2} + \frac{(-\Delta x)^3}{3!} \frac{\partial^3 q(x_i)}{\partial x^3} + \dots
\end{aligned} \tag{3.3}$$

1 階微分の項を消すために式 3.2 と式 3.3 を足し合わせると

$$q(x_{i+1}) + q(x_{i-1}) = 2q(x_i) + (\Delta x)^2 \frac{\partial^2 q(x_i)}{\partial x^2} + o((\Delta x)^4)$$

よって,

$$\frac{\partial^2 q(x_i)}{\partial x^2} \approx \frac{q(x_{i+1}) - 2q(x_i) + q(x_{i-1}))}{(\Delta x)^2} \tag{3.4}$$

となる.

3.1.2 移流方程式の差分

ここまでは、最も簡単な微分の形の差分について話してきたが、ここからは移流方程式の差分法について述べる。2.1.2 節の式 2.1 でも記載したが、移流方程式は、以下の形をした方程式のことをいう。一番左の $\frac{\partial q}{\partial t}$ は時間で微分しているため時間微分項、 $c \frac{\partial q}{\partial x}$ は空間で微分しているため空間微分項という。

$$\frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

移流方程式の差分法には、代表的なものとして、FTCS 法 (Forward-Time Centered-Space 法)・Lax 法 (Lax-Friedrichs 法)・風上法・Lax-Wendroff 法がある。これらの異なる点を以下の表 3.1 に示す。

方法	時間微分項	空間微分項
FTCS 法	1 次精度	2 次精度
Lax 法	1 次精度	1 次精度
風上法	1 次精度	1 次精度
Lax-Wendroff 法	2 次精度	2 次精度

表 3.1: 様々な差分法とその違い。(参考文献 [7] を参考に著者作成。)

FTCS 法は時間微分項が 1 次精度、空間微分項が 2 次精度で、Lax 法・風上法は時間微分項、空間微分項ともに 1 次精度、Lax-Wendroff 法は時間微分項、空間微分項ともに 2 次精度である。

まず FTCS 法は、時間に対して前進差分、空間に対して中心差分を用いる手法である (式 3.5)。計算コストが低いですが、数値的に不安定である。

$$\begin{aligned} \frac{q_i^{n+1} - q_i^n}{\Delta t} + c \frac{q_{i+1}^n - q_{i-1}^n}{2\Delta x} &= 0 \\ \Leftrightarrow q_i^{n+1} &= q_i^n - \frac{c\Delta t}{2\Delta x} (q_{i+1}^n - q_{i-1}^n) \end{aligned} \quad (3.5)$$

次に、Lax 法は FTCS 法の q_i^n を $\frac{q_{i+1}^n + q_{i-1}^n}{2}$ で平均化して置き換えたものである (式 3.6)。安定性は高くなるが、解が拡散するため、衝撃波がある場合には不向きである。

$$\begin{aligned} \frac{q_i^{n+1} - \frac{q_{i+1}^n + q_{i-1}^n}{2}}{\Delta t} + c \frac{q_{i+1}^n - q_{i-1}^n}{2\Delta x} &= 0 \\ \Leftrightarrow q_i^{n+1} &= \frac{q_{i+1}^n + q_{i-1}^n}{2} - \frac{c\Delta t}{2\Delta x} (q_{i+1}^n - q_{i-1}^n) \end{aligned} \quad (3.6)$$

風上法は物理的な流れの方向に合わせた差分を使うことで、安定性を向上させる方法である。左から右への流れ ($c > 0$) の場合は式 3.7, 右から左への流れ ($c < 0$) の場合は式 3.8 を用いる。安定性が高く, 非線形方程式に対しても利用できるが, 解は拡散してしまう。

$$\begin{aligned}\frac{q_i^{n+1} - q_i^n}{\Delta t} + c \frac{q_i^n - q_{i-1}^n}{2\Delta x} &= 0, c > 0 \\ \Leftrightarrow q_i^{n+1} &= q_i^n - \frac{c\Delta t}{\Delta x} (q_i^n - q_{i-1}^n)\end{aligned}\quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}\frac{q_i^{n+1} - q_i^n}{\Delta t} + c \frac{q_i^n - q_{i+1}^n}{2\Delta x} &= 0, c < 0 \\ \Leftrightarrow q_i^{n+1} &= q_i^n - \frac{c\Delta t}{\Delta x} (q_{i+1}^n - q_i^n)\end{aligned}\quad (3.8)$$

解が拡散する理由としては, テイラー展開したものを代入し近似すると移流拡散方程式に似た形になるからである。その仕組みを以下で説明する。まず, q_i^n (空間微分項) についてテイラー展開をすると

$$q_{i+1}^n = q_i^n + \Delta x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \mathcal{O}((\Delta x)^3) \quad (3.9)$$

次に q_i^{n+1} (時間微分項) についてテイラー展開をすると

$$q_i^{n+1} = q_i^n + \Delta t \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{(\Delta t)^2}{2!} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \mathcal{O}((\Delta t)^3) \quad (3.10)$$

式 3.9 と式 3.10 を式 3.8 に代入すると

$$\begin{aligned}q_i^n + \Delta t \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{(\Delta t)^2}{2!} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \mathcal{O}((\Delta t)^3) &= q_i^n - \frac{c\Delta t}{\Delta x} \left(\Delta x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \mathcal{O}((\Delta x)^3) \right) \\ \Leftrightarrow \frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} &= -\frac{\Delta t}{2!} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} - \mathcal{O}((\Delta t)^2) - \frac{c}{\Delta x} \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{c}{\Delta x} \mathcal{O}((\Delta x)^3) \\ \Leftrightarrow \frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} &= -\frac{c\Delta x}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + c\mathcal{O}((\Delta x)^2) - \mathcal{O}((\Delta t)^2)\end{aligned}\quad (3.11)$$

ここで $\frac{\partial q}{\partial t} = -c \frac{\partial q}{\partial x}$ より

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(-c \frac{\partial q}{\partial x} \right) = -c \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial q}{\partial x} \right) = -c \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right) = -c \left(-c \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \right) = c^2 \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \quad (3.12)$$

式 3.12 を式 3.11 に代入すると

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{c\Delta x}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} - \frac{c^2 \Delta t}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + c\mathcal{O}((\Delta x)^2) - \mathcal{O}((\Delta t)^2) \\
\Leftrightarrow & \frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = \left(-\frac{c\Delta x}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} - \frac{c^2 \Delta t}{2} \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \right) + c\mathcal{O}((\Delta x)^2) - \mathcal{O}((\Delta t)^2) \\
\Leftrightarrow & \frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{c\Delta x}{2} \left(1 + \frac{c\Delta t}{\Delta x} \right) \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + c\mathcal{O}((\Delta x)^2) - \mathcal{O}((\Delta t)^2)
\end{aligned} \tag{3.13}$$

以上, 式 3.13 が移流拡散方程式

$$\frac{\partial q}{\partial t} + c \frac{\partial u}{\partial x} = v \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

に形が似ているために解が拡散してしまうという原理である.

以上の 3 つの方法は式の中に $\frac{c\Delta t}{\Delta x}$ が含まれており, 安定した解を得るために

$$\frac{c\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

を満たす必要がある. これを CFL 条件 (Courant-Friedrichs-Lewy Condition) という.

最後に, Lax-Wendroff 法は時間微分項と空間微分項の両方で中心差分を用いる, 2 次精度の差分法である. Lax-Wendroff 法は移流方程式の数値解法として用いられることが多い. 上記の開放に比べて数値拡散が抑制されたり, 解の正確性が向上したりするが, 数値振動が起こることがある. 数値拡散とは解がぼやけ, 不正確な数値解になることで, 数値振動とは本来の解に対して数値解が上下に振動することを意味する. Lax-Wendroff 法の導出手順については以下に示す.

まず, $q_i^{(n+1)} = q(x, t + \Delta t)$ を t まわりでテイラー展開する.

$$\begin{aligned}
q_i^{n+1} &= q(x, t + \Delta t) \\
&= q(x, t) + \frac{\partial q(x, t)}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial^2 q(x, t)}{\partial t^2} \frac{(\Delta t)^2}{2!} + \mathcal{O}((\Delta t)^3)
\end{aligned} \tag{3.14}$$

次に, 移流方程式 2.1 の両辺を時間微分し, $\frac{\partial q}{\partial t}$ に $-c \frac{\partial q}{\partial x}$ を代入する.

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} = -c \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial q}{\partial x} = -c \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial q}{\partial t} = -c \frac{\partial}{\partial x} \left(-c \frac{\partial q}{\partial x} \right) = c^2 \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \tag{3.15}$$

最後に, 式 3.14 に式 3.15 を代入し, 空間微分の $\frac{\partial q}{\partial x}$ と $\frac{\partial^2 q}{\partial x^2}$ を式 3.1 と式 3.4 を用い

て中心差分で近似する.

$$\begin{aligned}
q_i^{n+1} &= q(x, t + \Delta t) \\
&\approx q + \left(-c \frac{\partial q}{\partial x}\right) \Delta t + \left(c^2 \frac{\partial^2 q}{\partial x^2}\right) \frac{(\Delta t)^2}{2!} \\
&= q_i^n + \left(-c \frac{\partial q_i^n}{\partial x}\right) \Delta t + \left(c^2 \frac{\partial^2 q_i^n}{\partial x^2}\right) \frac{(\Delta t)^2}{2!} \\
&= q_i^n - c \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^n - q_{i-1}^n}{2\Delta x}\right) + c^2 (\Delta t)^2 \frac{f(x_{i+1}) - 2f(x_i) + f(x_{i-1}))}{(\Delta x)^2}
\end{aligned}$$

以上が Lax-Wendroff 法である.

3.2 有限体積法

差分法は非線形問題にも使えるが, 安定性や精度の面から不向きである. 本節では, 有限体積法を利用した高精度な離散化方法を比較している Ruchika Lochab, Vivek Kumar (2022) [27] や, 差分法と体積法の基礎について述べられている姫野 (2005) [28] を元に, 非線形双曲型問題を高精度に解くための高精度な離散化方法について紹介する. 双曲型問題とは, 有限の速度で情報が伝播することを特徴とし, 物理的には波動や振動を記述するものである. 例えば移流方程式であり, 非線形双曲型問題となると非線形移流方程式が最も代表的な例である.

非線形移流方程式は衝撃波が発生する典型的な例である. 図 3.1 は図は 2 つに分かれており, 上部の図は解の伝播を表す特性線を示し, 下部の図は方程式を解いて流れの様子をプロットしたものである. 衝撃波とは各地点での流れの速さが異なることで起こる不連続のことで, 図 3.1 上部の図中の直線 (特性線) が交わっているところで発生する. 衝撃波が生じると離散化の方法によっては解が拡散したり, 振動したりする.

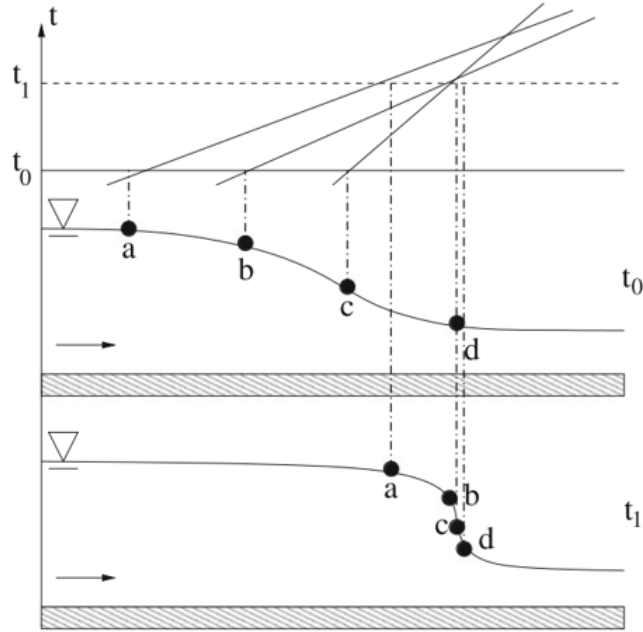


図 3.1: 浅瀬での水の流れを表す方程式で起こる不連続を示した図. 横軸が位置, 縦軸が時間を表す. 図は2つに分かれており, 上部の図は解の伝播を表す特性線を示し, 下部の図は方程式を解いて流れの様子をプロットしたものである. (参考文献 [3] 図 3.4 より転載.)

以降は非線形スカラー保存則

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f(q)}{\partial x} = 0$$

について有限体積法で離散化する方法を述べる.

有限差分法は点の集合である格子で分けられるのに対し, 有限体積法は計算領域をセルに分割する. また, 有限差分法はある格子点における物理量そのものが第 i 格子点の第 n 時刻の物質量となる (式 3.16) 一方で, 有限体積法は第 i 要素における空間の平均値 (式 3.17) が第 i 格子点の第 n 時刻の物質量となる.

$$q_i^n = q(i\Delta x, n\Delta t) \quad (3.16)$$

$$q_i^n = \frac{1}{\Delta x} \int_{x_{i-\frac{1}{2}}}^{x_{i+\frac{1}{2}}} q(x, n\Delta t) dx \quad (3.17)$$

式 3.17 について, 数値計算では積分することは難しいため, 数値流束

$$F_{i-\frac{1}{2}}^n = cq_{i-\frac{1}{2}}^n \text{ (流入)}$$

$$F_{i+\frac{1}{2}}^n = cq_{i+\frac{1}{2}}^n \text{ (流出)}$$

を用いる。数値流束とは仮想的なセルを通過する物理量のことである。式中の c は流れの速さを表す。

これを移流方程式に適用すると、時間微分項には関係ないため単純な差分として表され、空間微分項は数値流束を用いて表すこととなる。

$$\begin{aligned}\frac{q_i^{n+1} - q_i^n}{\Delta t} &= - \left(\frac{F_{i-\frac{1}{2}}^n - F_{i+\frac{1}{2}}^n}{\Delta x} \right) \\ \Leftrightarrow q_i^{n+1} &= q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i-\frac{1}{2}}^n - F_{i+\frac{1}{2}}^n) \\ \Leftrightarrow q_i^{n+1} &= q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (cq_{i-\frac{1}{2}}^n - cq_{i+\frac{1}{2}}^n)\end{aligned}\tag{3.18}$$

有限体積法は数値流束 $F_{i\pm\frac{1}{2}}^n$ を推定する方法によって Roe 法や Lax-Friedrichs 法, Godunov 法などに種類が分かれている。前の節で話した有限差分法の Lax-Wendroff 法は、高次精度だが数値振動が発生しやすい一方で、有限体積法の Roe 法は不連続点でも振動が少なく、計算が安定する（単調性が保たれる）が、不必要に滑らかになりすぎることがある。そこで、これらのメリットデメリットを上手く利用する方法として、有限体積法の中でも TVD（Total Variation Diminishing）法が存在する。TVD 法は高精度かつ単調性も担保されており、時間とともに解の値のばらつきが増えないことを保証する。TVD 法は以下の TVD 条件（式 3.20）を満足する手法のことをいう。

$$TV(q^n) = \sup \sum_{i=0}^{n-1} |q_{i+1}^n - q_i^n|\tag{3.19}$$

として、

$$TV(q^{n+1}) \leq TV(q^n)\tag{3.20}$$

式 3.19 の $\sum_{i=0}^{n-1} |q_{i+1}^n - q_i^n|$ は i が 0 から $n-1$ までの範囲で、隣り合う点との差の絶対値の合計を表している。sup は、 n の値を変化させることで、セルの分割を様々に変化させて合計を計算し、その中で一番大きいものを選ぶことを意味する。 $TV(q^n)$ の値が大きいと、値が多く変動しているということになり、急激な変化や不連続な変化が多いことを意味する。式 3.20 は、反復して計算し、何度も値を更新していく上で、次のステップで計算された値の変動が、前のステップで計算された値の変動より小さいことを表す条件である。これにより、数値振動を抑えることができる。

また、TVD 法では TVD 条件を満たすために制限関数を導入する。制限関数の役割は手法の切り換えを行うことである。変化が滑らかな部分では高精度スキームに、衝撃波など急激に変化する部分では数値振動を抑える低次スキームに切り替える。

制限関数にも様々種類があり, Monotonized Central(MC), Van Albada(VA), Min-mod(MM), および Van Leer(VL) などである. MM を使用することによって得られた解は, 少し数値拡散が生じてしまうが, MC および VA を使用した場合, 多少の振動があるものの, MM よりは優れた結果がでることがわかっている [27].

第4章 提案モデル

4.1 概要

本研究では、交通流モデルで用いられる移流方程式をベースに「徒歩の人口密度変化を時系列で表す式」と「自動車の密度変化を時系列で表す式」の2つを用意する。そして、乗り捨てが起こることで自動車の密度が小さくなり、徒歩の密度が大きくなるように右辺に物質の生成と消失を表す反応項を追加する。本研究では車線は1車線のみとしている。また歩行者の速度は一定、自動車の速度は現在の位置の密度に応じて変化する線形の式で表し、参考文献 [3] に記載してある最もベーシックな式 2.4 を参考として用いる。また、境界条件は $x = 0$ で流入なし、 $x = L$ で流出なしとする。前者については初期段階で分布している避難者の他に新たに避難者が増えないようにするためである。

下の図はイメージ図である。横軸が距離で左が海岸線、右が山側を表す。避難者は左から右に向けて、海岸線から離れるように避難する。 u と v はそれぞれ歩行者と自動車の速度であり、単位は km/hour。 p_1 km $\sim$ p_2 km の黄色い範囲で乗り捨てが行われるとしている。

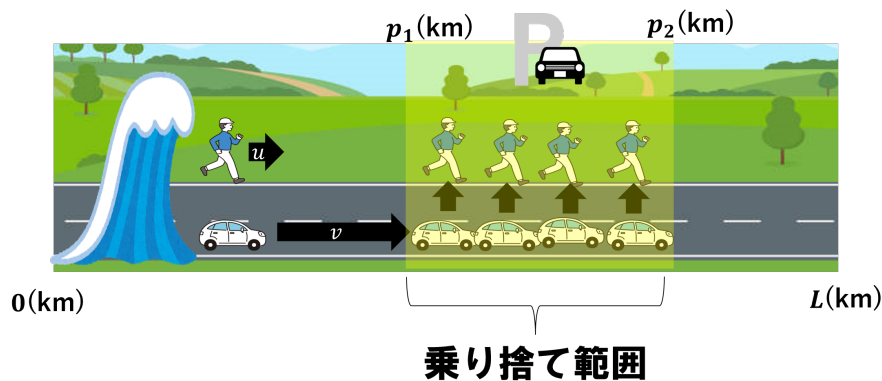


図 4.1: 歩行者と自動車の避難のイメージ図。横軸が距離で左が海岸線、右が山側を表す。避難者は左から右に向けて、海岸線から離れるように避難する。 u と v はそれぞれ歩行者と自動車の速度。黄色く色づけた範囲で乗り捨てが行われる。(著者作成。)

4.2 数式

先ほどの概要に従って構築したモデルを以下に示す．歩行者についての式，自動車についての式を示したのちに，乗り捨てやすさを表す λ についてその場の密度だけでなく前方の車両の密度を踏まえて変化するようにしたものを示す．

4.2.1 歩行者の式

まずはイメージ図とともに，歩行者の式から示す．

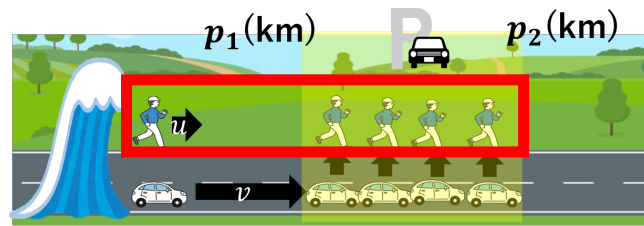


図 4.2: 歩行者避難のイメージ図．横軸が距離で左が海岸線，右が山側を表す．避難者は左から右に向けて，海岸線から離れるように避難する．歩行者を赤で囲っている．（著者作成．）

- 黄色で色づけた乗り捨て可能範囲に存在するとき ($p_1 < x < p_2$)

$$\frac{\partial}{\partial t} f_1(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} (u f_1(t, x)) = p \lambda f_2(t, x) \quad (4.1)$$

- 黄色で色づけた乗り捨て可能範囲外に存在するとき ($x < p_1, p_2 < x$)

$$\frac{\partial}{\partial t} f_1(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} (u f_1(t, x)) = 0 \quad (4.2)$$

$f_1(t, x)$ は時間 t 空間 x での徒歩人口の密度分布（人/km）， u は歩行の速度（一定）（km/hour）， λ は乗り捨てやすさを表す文字， p は 1 台の自動車に乗っている人数（人）， $f_2(t, x)$ は自動車の密度分布を表している．本研究の新規性は，式 4.1 の右辺に反応項である $p \lambda f_2(t, x)$ を付け足した点である．この項は乗り捨てによって自動車に乗っていた人が歩行者に変わり，歩行者が増加することを表しており，それは自動車 1 台に何人が乗っているか（ p ）によっても増減する．

4.2.2 自動車の式

次に, イメージ図とともに, 自動車の式を示す.

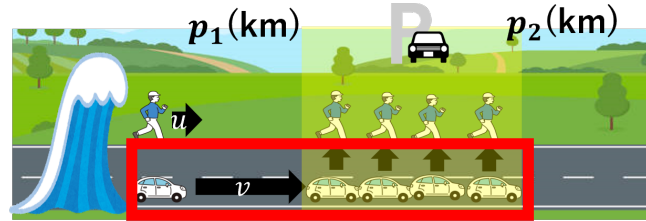


図 4.3: 自動車避難のイメージ図. 横軸が距離で左が海岸線, 右が山側を表す. 避難者は左から右に向けて, 海から離れるように避難する. 自動車を赤で囲っている. (著者作成.)

- 黄色で色づけた乗り捨て可能範囲に存在するとき ($p_1 < x < p_2$)

$$\frac{\partial}{\partial t} f_2(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{max} \left(1 - \frac{f_2(t, x)}{f_{2,max}} \right) f_2(t, x) \right) = -\lambda f_2(t, x) \quad (4.3)$$

- 黄色で色づけた乗り捨て可能範囲外に存在するとき ($x < p_1, p_2 < x$)

$$\frac{\partial}{\partial t} f_2(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{max} \left(1 - \frac{f_2(t, x)}{f_{2,max}} \right) f_2(t, x) \right) = 0 \quad (4.4)$$

変数については $f_2(t, x)$ が時間 t 空間 x での自動車の密度分布 (台/km), v_{max} が自動車の最高速度 (km/hour), $f_{2,max}$ が自動車の最高密度 (台/km) を表している. 歩行者の式と異なり, 反応項には消失を表すマイナスがついており, 乗り捨てによって自動車の密度が小さくなる様子を表す.

4.2.3 前の車両の密度によって変化する λ

2.1.2 では, その場の自動車密度に加えて, 前方の自動車密度を踏まえて速度が変わる自動車速度の式があると触れた. それと同じように乗り捨てについても, 現実的にはその場の密度に加えて前方の密度も踏まえて乗り捨てるか乗り捨てないかを定めるはずである. 以下にはその場の密度だけでなく, 前方の密度情報を踏まえて乗り捨てやすさが決まるように変更した λ についての式と, イメージ図を示す.



図 4.4: λ のイメージ図. 左は前方の車両数が多いため乗り捨てやすい様子を, 右は前方の車両が少ないため乗り捨てにくい様子を表している. オレンジが目している車両であり, 前方とはオレンジの車両から l km 先の区間を表している. (著者作成.)

左の図は前方の車両数が多いため乗り捨てやすい様子を, 右の図は前方の車両が少ないため乗り捨てにくい様子を表している. オレンジが目している車両であり, 前方とはオレンジの車両から l km 先の区間を表している.

$$\lambda(t, x) = \lambda_0 \int_x^{\min\{x+l, L\}} f_2(t, x) dx + \lambda_1 \quad (4.5)$$

$\lambda(t, x)$ は時間 t 空間 x での λ の値, l は, 密度を加味する前方の距離 (km), L は道路の全長 (km) を表す. つまり, 式 4.5 は現在の位置 x から l km 先の $x + l$ km までの間に存在する, 車両の台数を合計したものによって変化するものとなっている. ただし, $x + l$ が道の全長 L を超える場合に関しては, $x + l$ ではなく x から L までの間に存在する車両の台数をカウントする. 式全体としては切片 λ_1 , 傾き λ_0 の直線の式であり, λ_1 と λ_2 の値によって, どれだけ前方の密度情報を重視するのか等が変わってくる. 本来ならば, 実際のデータに基づいて式の形 (線形なのか, 指数関数なのか) や, 係数の値などを決めるべきだが, 今回はデータがなく, どの式が現実には一番フィットしているかわからないため, 本研究では仮に λ は線形であるとしている.

しかし, 前方の密度情報により車両の速度が変化するモデルについて書かれた先行研究 [22] では, 速度を決めるにあたって前方の密度に指数関数の形で従う式が示されていた. 速度と同じように乗り捨てのしやすさも変化するのであれば, 式 4.6 のように指数関数に従う形の方が現実のデータにマッチしているのかもしれない.

$$\lambda(t, x) = \exp \left(\lambda_0 \int_x^{\min\{x+l, L\}} f_2(t, x) dx + \lambda_1 \right) \quad (4.6)$$

第5章 数値計算結果と考察

まずは本研究で用い, 検討するモデル (4.2 節) をまとめて以下に再掲する.

歩行者のモデル

- 乗り捨て可能範囲に存在するとき ($p_1 < x < p_2$)

$$\frac{\partial}{\partial t} f_1(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} (u f_1(t, x)) = p \lambda f_2(t, x)$$

- 乗り捨て可能範囲外に存在するとき ($x < p_1, p_2 < x$)

$$\frac{\partial}{\partial t} f_1(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} (u f_1(t, x)) = 0$$

自動車のモデル

- 乗り捨て可能範囲に存在するとき ($p_1 < x < p_2$)

$$\frac{\partial}{\partial t} f_2(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{\max} \left(1 - \frac{f_2(t, x)}{f_{2, \max}} \right) f_2(t, x) \right) = -\lambda f_2(t, x)$$

- 乗り捨て可能範囲外に存在するとき ($x < p_1, p_2 < x$)

$$\frac{\partial}{\partial t} f_2(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_{\max} \left(1 - \frac{f_2(t, x)}{f_{2, \max}} \right) f_2(t, x) \right) = 0$$

λ

$$\lambda(t, x) = \lambda_0 \int_x^{\min\{x+l, L\}} f_2(t, x) dx + \lambda_1$$

境界条件

$x = 0$ で流入なし, $x = L$ で流出なしとする. 前者については初期段階で分布している避難者の他に新たに避難者が増えないようにするためである.

離散化方法については, 差分法を用いても CFL 条件をギリギリで満たすのではなく, 刻み幅を細かくしたりして余裕をもって満たすようにすれば数値拡散が少な

くなる．本研究では非線形非線形移流方程式にも使えるということで，1 次精度の風上法を用いて離散化する．

本章では，まず条件をシンプルにした仮想世界で構築した数理モデルが自動車乗り捨てを表現できていることをシミュレーションによって確認したのちに，自動車乗り捨てが死亡者数減少に有効な場合の条件についてシミュレーション結果とともに考察する．次に λ_0 の値を変化させてシミュレーションを行い，最も死亡者数が少なくなる λ_0 を明らかにする．最後に宮城県東松島市にモデルを適用しシミュレーションを行い，より現実近く実践的な結果と考察を行う．

5.1 条件をシンプルにした仮想世界

まずは乗り捨て場の位置や津波の条件，歩行者や自動車の密度の初期分布等をシンプルにした仮想世界で計算を行った結果について示す．

5.1.1 計算条件

まずは，計算条件について表（5.1）に示す．

空間の長さ（道の全長） L	10(km)
空間の分割数（ nx ）	2000
時間（ T ）	1(hour)
時間の分割数（ nt ）	10000
歩行者の密度の初期分布	平均 4, 分散 1 の正規分布の値をすべて $\times 300$
自動車の密度の初期分布	平均 2, 分散 1 の正規分布の値をすべて $\times 150$
歩行速度（ u ）	8(km/hour)
自動車の最高速度（ v_{max} ）	40(km/hour)
自動車の最高密度（ $f_{2,max}$ ）	120(vehicle/km)
1 台の自動車に乗っている人数（ p ）	2(people/vehicle)
λ_0	0.01
λ_1	0
どれだけ先の密度情報を考慮するか（ l ）	100（約 67m）
津波の最終到達地点	海岸から 5km
津波の襲来時刻	地震発生から 30 分後

表 5.1: 条件をシンプルにした仮想世界での計算条件

時間と空間の分割数は CFL 条件を満たすように設定する．分布は正規分布で，徒歩避難者より自動車避難者の方が海岸寄りに分布の山がくるようにする．理由は徒歩避難者より自動車避難者の方が移動距離が長い位置に存在していることが

多いと考えたためである。今回分布が表すのは1kmあたりの人口密度もしくは車両密度としているが、正規分布は積分すると1になるようになっているため、密度が0.3 (people/km もしくは vehicle/km) などになってしまう。そのため、150 倍や 300 倍をして値を大きくしている。図 1.5 のアンケート結果を参考に本節では自動車避難者数と徒歩避難者数が同じと仮定する。自動車には2人乗っているとしているため、自動車の合計台数は歩行者の人数の 1/2 にする必要がある。そのため、自動車の分布は× 150, 歩行者の分布は× 300 となっている。また歩行速度は命の危機が迫っている状況で多くの人が急ぎ早に移動していると仮定し、ジョギングとランニングの間ほどの速さに設定する（参考文献 [29]）。自動車の最高速度と最高密度については Z. Wang and G. Jia (2021) で採用されていた条件と同じくそれぞれ 40km/hour と 120vehicle/km とする。120vehicle/km というのは道路が大規模に損傷を受けた場合であり、Alireza Mostafizi ら (2017) [30] では道路が完全に渋滞し、自動車がほとんど動かない状態において 1km あたりに存在する車両の最大数が 155(vehicle/km) とされている。 $v_{max} = 40$ とすると、自動車の密度分布の値から、密度が高く最も速度が遅くなるところでも、20km/hour である。1 台の自動車に乗っている人数については平日 1.33 人、休日 1.72 人である [31]。しかし避難時には乗り合わせると仮定し、少し多く見積もって 2 人とする。 λ の係数 λ_0, λ_1 に関してはのちに詳しく検討するが、本節では $\lambda_0 = \frac{1}{100}, \lambda_1 = 0$ とし、前方の車両数が 0 ならば乗り捨ては行われれないとする。

東日本大震災で津波被害を受けた仙台平野等では海岸線から約 5km 内陸まで浸水していることが確認できたという [32]。また、津波の観測値は以下の表 5.2 の通りであり、地震発生時刻が 2011/3/11/14:46 であることを踏まえると、地震発生から約 30 分後に津波が押し寄せている。また、大石雅之（岩手県立博物館）が写真を分析した結果、岩手県の重茂半島の太平洋側の宮古市と山田町の境界付近では、津波の速度は 115km/hour だったことが明らかになった [33]。115km/hour で 5km 移動するのにかかる時間はわずか 2-3 分である。同資料 ([33]) から、津波は最初はゆっくりと水位が上昇し、その後水位が下がり、直後に高速の大きな波が到達したことがわかっている。つまり、最大波の日時と津波が町全体を飲み込んだ時間はほぼ同じと考えてよい。

これらを元に、本節では地震発生から 30 分後に海岸から 5km の地点まで津波が押し寄せ、その時点で海岸から 5km よりも山側にいたものは生き残り、海側にいたものは死亡するとする。そして津波に呑みこまれた人はもれなく死亡するとする。以後出てくる生存者数と死亡者数は、津波が押し寄せた時間に津波の最終到達地点より海岸より存在した人数を死亡者、山側に存在した人を生存者と定義する。

乗り捨て場について図 5.1 のような、イオンモールの広い駐車場を想定している。写真はイオンモール高崎だが、本節では石川県にあるイオンモール白山を乗り捨て場として仮定する。イオンモール白山の形は上から見ると図 5.2 のように正方形になっており一辺は 450m、四方が駐車場に囲まれたショッピングモールである。切りがよい数字にするため本研究では乗り捨て可能範囲の広さは 500m とし、駐車場へ

は入り口は関係なく、どこからでも進入できると仮定する。この駐車場は図に記載の通り 3800 台駐車可能である。

乗り捨て場の位置は、乗り捨て可能範囲のスタート位置を 2.5km から 500m ごとに変化させたものを用いる。乗り捨て可能範囲はイオンモール白山の大きさを参考に 500m とする。人々はこの 500m の間に自動車を乗り捨てて、避難手段を徒歩に変更することができる。また乗り捨て可能範囲のスタートが 2.5km からになっているのは、あまりにも早くに乗り捨て場があったとしても、早めに乗り捨てると初めから徒歩で避難していた状況と変化がない。また多くの人は早く遠くに行きたいと思って自動車で避難しているのに、早めに自動車を乗り捨てることは考えにくいため、津波の最終到達地点である 5km の半分を超えた 2.5km 地点スタートの設定にしている。

観測地点	最大波の日時	波の高さ
宮古（岩手県）	3/11 15:26	8.5m 以上
釜石（岩手県）	3/11 15:21	4.2m 以上
大船渡（岩手県）	3/11 15:18	8.0m 以上
石巻市鮎川（宮城県）	3/11 15:26	8.6m 以上

表 5.2: 主な検潮所における津波の観測値。（参考文献 [8] 表 2.2-2 を一部抜粋し著者作成。）



図 5.1: 乗り捨て場のイメージ図。イオンモール高崎の駐車場の例。（出典元：<https://www.walkerplus.com/spot/ar0310s23062/photo> 最終閲覧日：2024/11/1）



図 5.2: イオンモール白山の駐車場. (出典元: <https://hakusan.aeonmall.com/static/detail/access> 最終閲覧日: 2024/11/1)

5.1.2 結果

はじめに乗り捨てなしの結果について述べたのち, 乗り捨て可能区間のスタート位置を 2.5km から 500m ごとに変化させたものを示す.

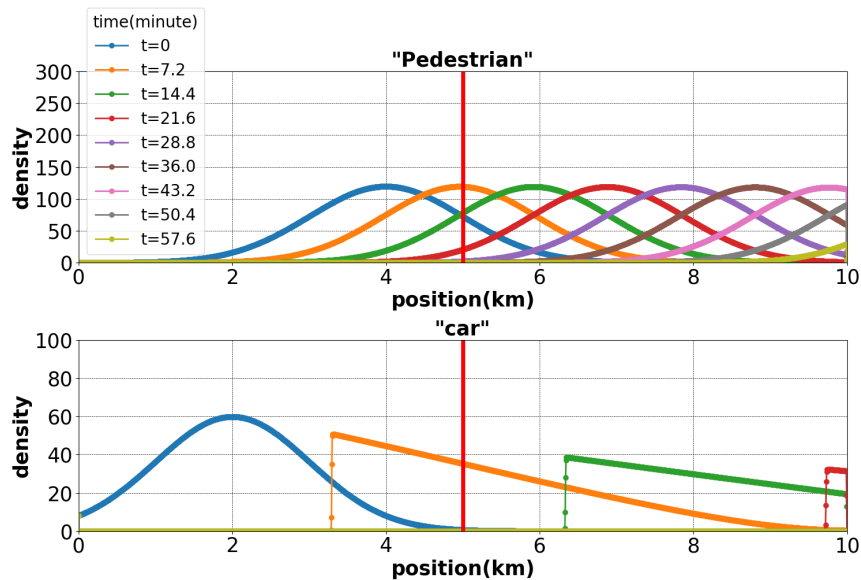


図 5.3: 乗り捨てなしの場合. 上が歩行者, 下が自動車の図. 横軸は海岸からの距離 (km) で縦軸は密度 (people/km もしくは vehicle/km). 色の違いは地震発生からの時間を表しており, 凡例の通り青が 0 分後, オレンジが 7.2 分後, 緑が 14.4 分後, 赤が 21.6 分後, 紫が 28.8 分後, 茶色が 36 分後, ピンクが 43.2 分後, 灰色が 50.4 分後, 黄土色が 57.6 分後を表している. 赤の縦線は 5km の地点.

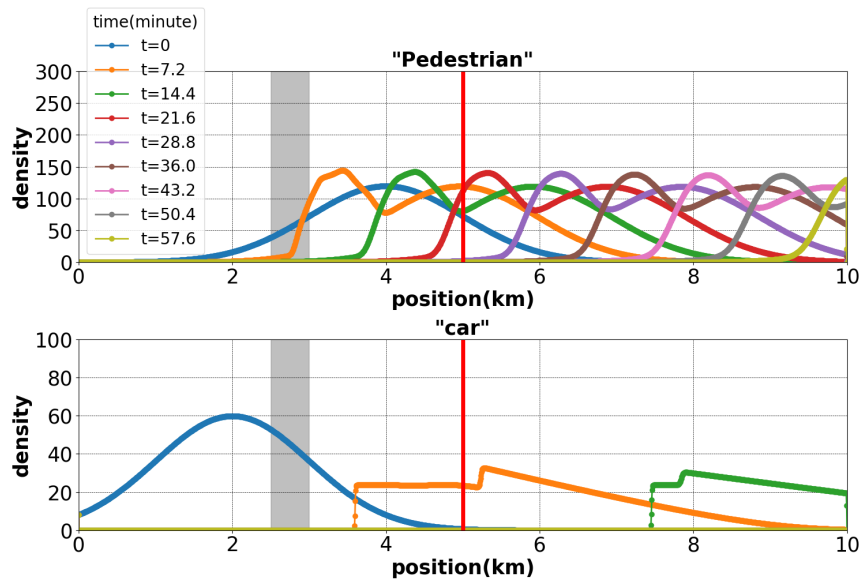


図 5.4: 乗り捨て可能区間が 2.5-3km のとき. 灰色の網掛け部分は乗り捨て範囲を表す.

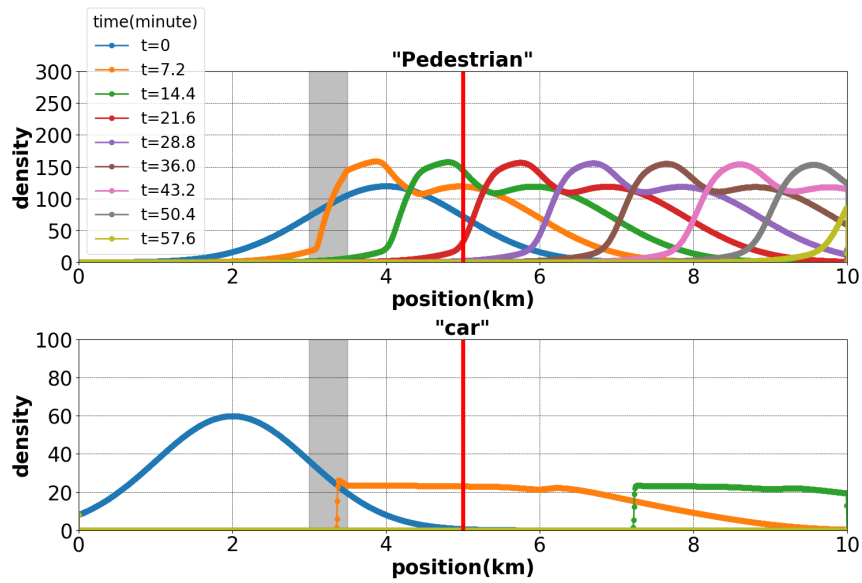


図 5.5: 乗り捨て可能区間が 3-3.5km のとき.

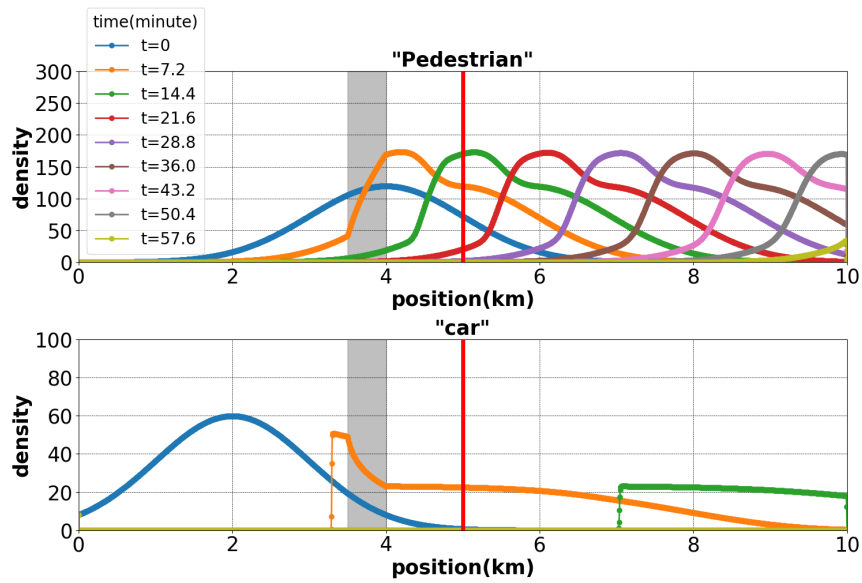


図 5.6: 乗り捨て可能区間が 3.5-4km のとき.

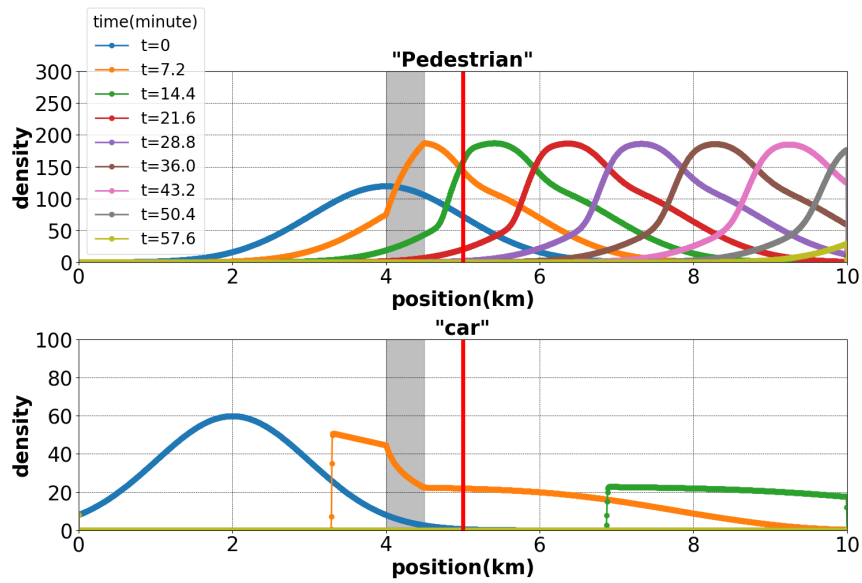


図 5.7: 乗り捨て可能区間が 4-4.5km のとき.

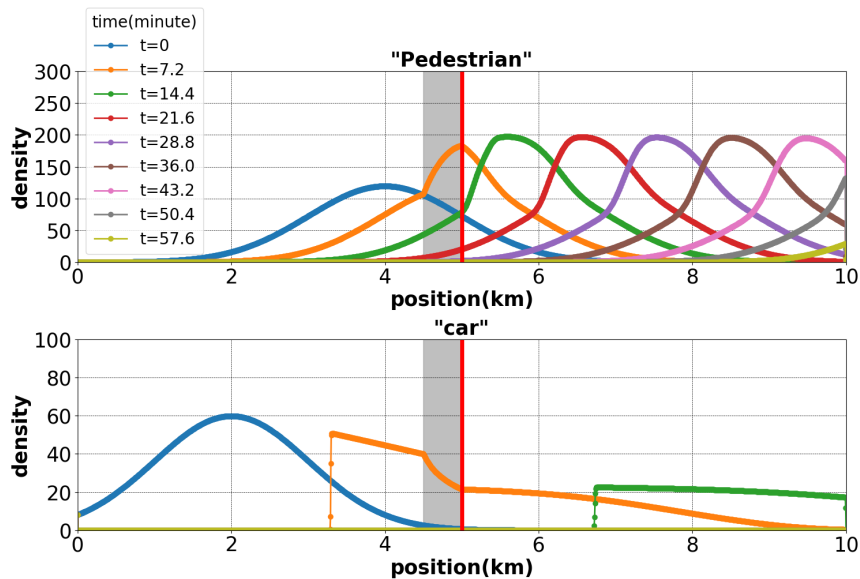


図 5.8: 乗り捨て可能区間が 4.5-5km のとき.

上が歩行者, 下が自動車の図である. 横軸は海岸からの距離 (km) で縦軸は密度 (people/km もしくは vehicle/km) を表している. グラフの色の違いは地震発生からの時間を表しており, 凡例の通り青が 0 分後, オレンジが 7.2 分後, 緑が 14.4 分後, 赤が 21.6 分後, 紫が 28.8 分後, 茶色が 36 分後, ピンクが 43.2 分後, 灰色が 50.4 分後, 黄土色が 57.6 分後を表している. 赤の縦線は津波の最終到達地点と設定した 5km の地点を表している. 津波の最終到達地点より海側にいるものは全員死亡するとしているため, 津波が到達する 30 分後のおおよその生存者と死亡者は, 約 30 分後のグラフである紫のグラフに着目して, 赤線より左部分が死亡者, 右部分が生存者とみることができる. 自動車に乗っている人は, 灰色の網掛け範囲で乗り捨てることができ, 乗り捨てやすさ λ は前方の密度によって決まる. 自動車のグラフについては衝撃波により不連続部分が発生してしまっている.

これらのグラフから灰色の網掛け部分で歩行者の人数が増え, 自動車は減っていることがわかるため, 構築した数理モデルにより自動車の乗り捨てが表せているといえる.

津波による死亡者数については, 乗り捨てなしの場合ですでにほとんどおらず, 乗り捨てありの場合でも変わらず死亡者数はほぼ 0 であることから上記の条件下では, 乗り捨てを行う必要はない.

では, 実際に乗り捨てを行う必要があるとき (乗り捨てを行うことによって死亡者数が減少するとき) はどのようなときなのか. それは, 本来ならば速度の速い自動車が歩行者の速度より遅くなり, 自動車で避難するより徒歩で避難した方が早いときである. そしてそうなるのは, 自動車の台数が多く渋滞しているときか, 道路の損傷や余震, 歩行者との交錯による安全運転などで自動車がそれほどスピードを出せないときである. 前者については, 密度の値を全体的に大きくすることで表現

できるが、そうせずとも最高密度 $f_{2,max}$ を小さくすることで再現できる。しかし、一次精度風上差分法だと計算が不安定になりエラーが出る。そのため TVD 法などにより高精度な計算を行う必要がある。後者については、最高速度 v_{max} を小さくすることで再現できる。これは不安定になることなく計算できるため、以降は自動車の最高速度を変えたときの乗り捨て区間と死亡者数の関係について述べる。

$v_{max} = 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 40$ について、乗り捨て可能区間と死亡者数の関係を図 5.9-5.20 に示す。乗り捨て可能区間は 0-0.5km, 0.5-1km, 1-1.5km, 1.5-2km, 2-2.5km, 2.5-3km, 3-3.5km, 3.5-4km, 4-4.5km, 4.5-5km の 10 パターン。このすべての場合において、 Δt と Δx の値を変えなくても CFL 条件は満たしている。また、上記（表 5.1）の計算条件と同様に歩行者の密度の初期分布を平均 4、分散 1 の正規分布の値をすべて $\times 300$ 、自動車の密度の初期分布を平均 2、分散 1 の正規分布の値をすべて $\times 150$ したものとすると、 $v_{max} = 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 40$ の時、最も速度が遅くなるところでそれぞれ、5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10, 20km/hour である。

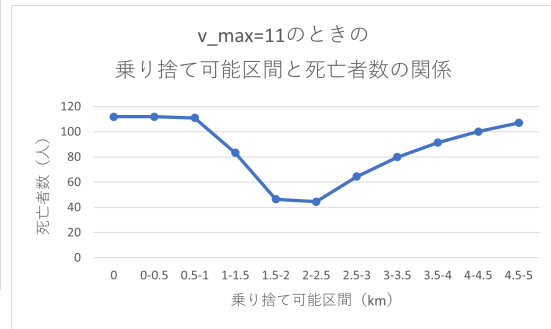
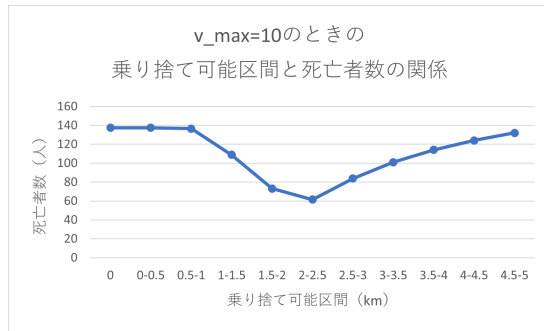


図 5.9: 自動車の最高速度 $v_{max} = 10\text{km/hour}$ の時の乗り捨て区間と死亡者数の関係. 横軸が乗り捨て区間 (km) , 11km/hour 縦軸が死亡者数 (人) を表す.

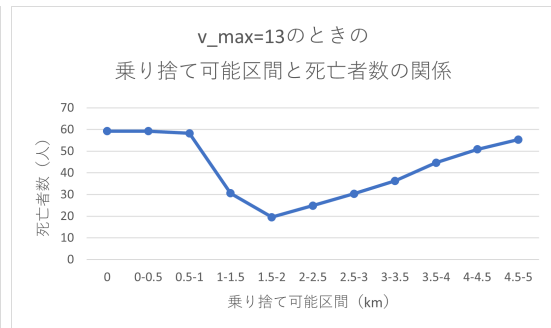
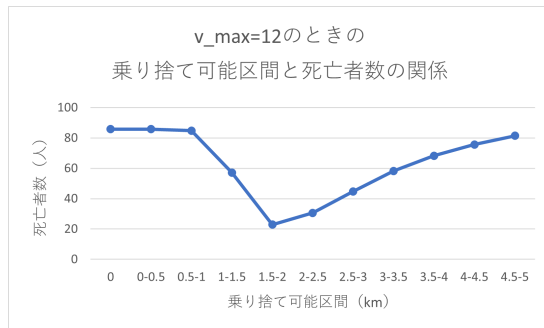


図 5.11: 自動車の最高速度 $v_{max} = 12\text{km/hour}$ 図 5.12: 自動車の最高速度 $v_{max} = 13\text{km/hour}$

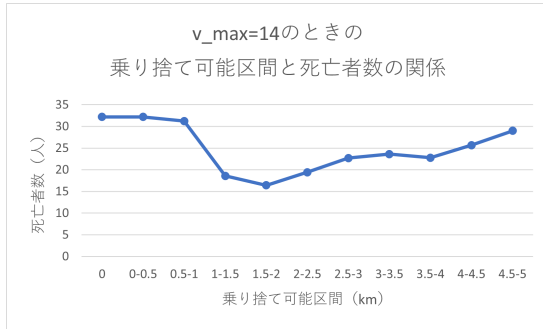


図 5.13: 自動車の最高速度 $v_{max} = 14$ km/hour

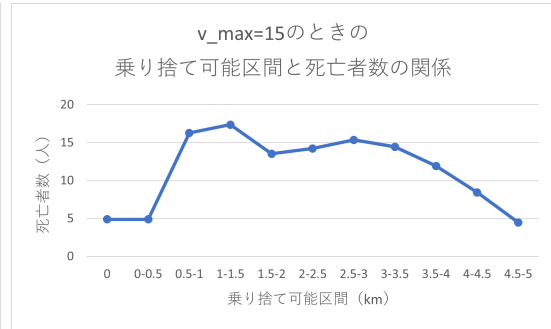


図 5.14: 自動車の最高速度 $v_{max} = 15$ km/hour

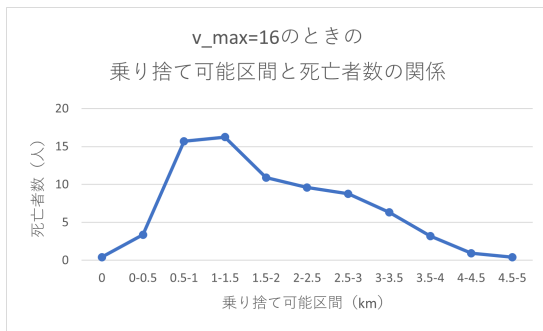


図 5.15: 自動車の最高速度 $v_{max} = 16$ km/hour

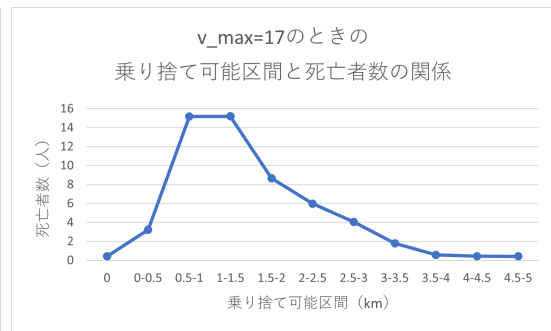


図 5.16: 自動車の最高速度 $v_{max} = 17$ km/hour

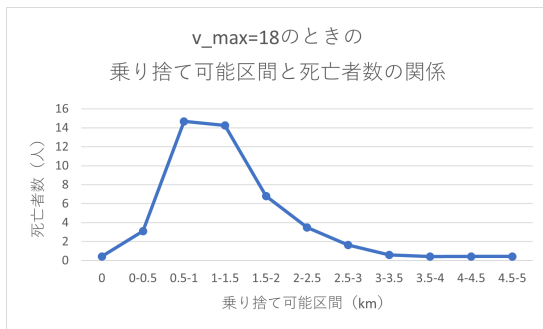


図 5.17: 自動車の最高速度 $v_{max} = 18$ km/hour

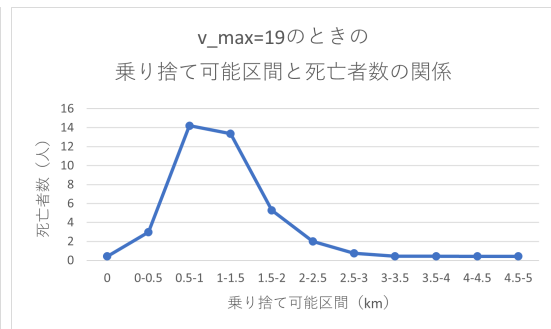


図 5.18: 自動車の最高速度 $v_{max} = 19$ km/hour

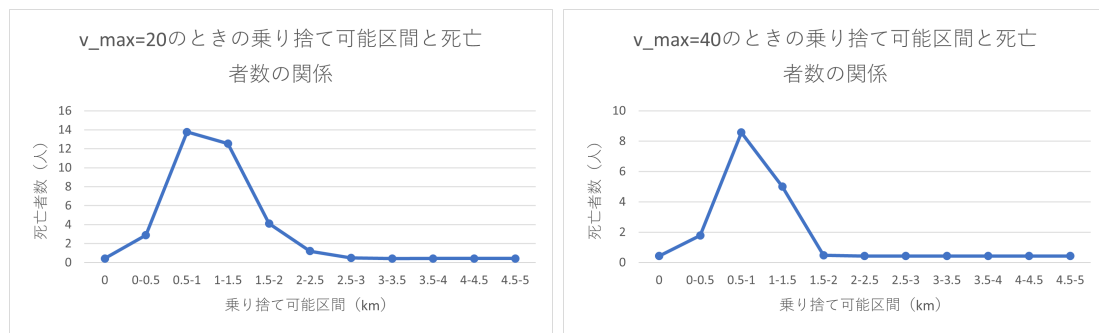


図 5.19: 自動車の最高速度 $v_{max} = 20\text{km/hour}$

図 5.20: 自動車の最高速度 $v_{max} = 40\text{km/hour}$

図 5.9～図 5.20 から, $v_{max} = 14$ 以下の場合は乗り捨てによって死亡者数が減少するが, $v_{max} = 15$ 以上の場合は乗り捨てしてもしなくても死亡者数が変わらないか, 乗り捨てによってかえって死亡者数が増加するという結果になった.

$v_{max} = 14$ の時, 自動車の速度が最も遅くなるところが 7km/hour であり, 歩行者の速度を 8km/hour で一定としているため, 乗り捨てが死亡者数減少に有効な状況にするには歩行者より遅くなる部分があるというのが最低限の必要条件であることがわかる. しかし, 歩行者の速度より遅い部分があるからと言って, 自動車の最遅速度が 7.5km/hour など 8km/hour に近くなると, どこに乗り捨て区間を設けても乗り捨てによって死亡者数が増える結果となってしまうため, 条件に応じてそのラインを探る必要がある. 今回の条件下ではそのラインが $v_{max} = 14$ であった.

$v_{max} = 14$ 以下では, 自動車の速度が歩行者よりも遅くなる部分があるため, 乗り捨てないと自動車の渋滞が原因で自動車避難者の死亡者数が多くなる. 乗り捨てをすると, 乗り捨て場の場所によっては徒歩避難者の死亡者数は多少増えるが, 自動車の渋滞が解消され自動車の速度は上がるため, 自動車避難者の死亡者数は減り, 全体でみると死亡者数が減少する.

$v_{max} = 15$ 以上では, 乗り捨てない場合でも自動車の速度が速いため, 歩行者の死亡者数と自動車避難者の死亡者数は元々どちらも少ない. 一方で乗り捨てをすると, 自動車の速度が速くなる必要がないのに速くなり, 乗り捨てて歩行者になった人たちが死亡者数の増加につながる.

特に $v_{max} = 14$ 以下の中でも $v_{max} = 10, 11$ は乗り捨て区間が $2-2.5\text{km}$ のときに最も死亡者数が少なくなり, $v_{max} = 12, 13, 14$ は乗り捨て区間が $1.5-2\text{km}$ のときに最も死亡者数が少なくなる.

また, $v_{max} = 15$ 以上の中でも $v_{max} = 15, 16, 17$ のときは乗り捨て区間が $1-1.5\text{km}$ のときに最も死亡者数が多くなり, $v_{max} = 18, 19, 20, 40$ のときは乗り捨て区間が $0.5-1\text{km}$ のときに最も死亡者数が多くなる. しかし, 図 5.14～図 5.19 から, 乗り捨て区間が $0.5-1\text{km}$ の時の死亡者数と乗り捨て区間が $1\text{km}-1.5\text{km}$ の時の死亡者数が 1 名程度しか変わらず, ほとんど同じ死亡者数であることがわかる. 一方で $v_{max} = 40$ の時は圧倒的に乗り捨て区間が $0.5-1\text{km}$ のときに死亡者数が多い. つまり, $v_{max} = 15$

以上のときは乗り捨て区間が 0.5-1km のときに死亡者数が最も多くなると言える.

以下は, 乗り捨て区間が 2-2.5km のときに最も死亡者数が少なく v_{max} の値を代表して $v_{max} = 10$, 乗り捨て区間が 1.5-2km のときに最も死亡者数が少なくなる v_{max} の値を代表して $v_{max} = 13$, 乗り捨て区間が 1-1.5km のときに最も死亡者数が多くなる v_{max} の値を代表して $v_{max} = 15$, 乗り捨て区間が 0.5-1km のときに最も死亡者数が多くなる v_{max} の値を代表して $v_{max} = 19$ を取り上げる. その中でも比較するために $v_{max} = 10, 13$ は乗り捨て区間が 1.5-2km と 2-2.5km, $v_{max} = 15, 19$ は乗り捨て区間が 0.5-1km と 1-1.5km の時の密度の時間経過を表したグラフを示す.

図 5.21 は $v_{max} = 10$ で乗り捨て区間が 1.5-2km, 図 5.22 は $v_{max} = 10$ で乗り捨て区間が 2-2.5km, 図 5.23 は $v_{max} = 13$ で乗り捨て区間が 2-2.5km, 図 5.24 は $v_{max} = 13$ で乗り捨て区間が 2-2.5km, 図 5.25 は $v_{max} = 15$ で乗り捨て区間が 0.5-1km, 図 5.26 は $v_{max} = 15$ で乗り捨て区間が 1-1.5km, 図 5.27 は $v_{max} = 19$ で乗り捨て区間が 0.5-1km, 図 5.28 は $v_{max} = 19$ で乗り捨て区間が 1-1.5km, 図 5.29 は $v_{max} = 40$ で乗り捨て区間が 0.5-1km, 図 5.30 は $v_{max} = 40$ で乗り捨て区間が 1-1.5km である.

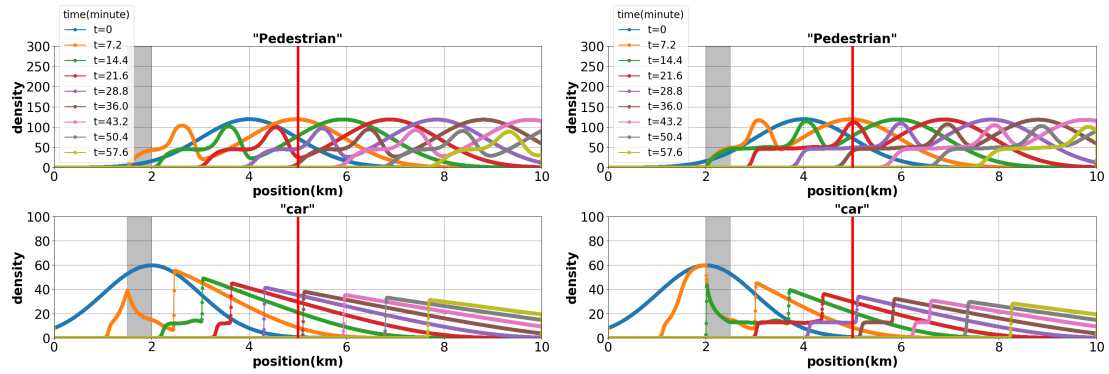


図 5.21: 自動車の最高速度 $v_{max} = 10$ km/h で乗り捨て区間が 1.5-2km

図 5.22: 自動車の最高速度 $v_{max} = 10$ km/h で乗り捨て区間が 2-2.5km

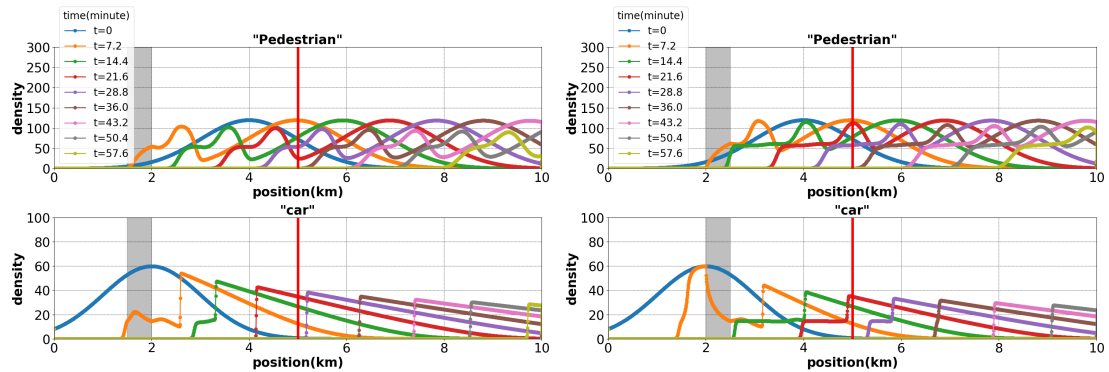


図 5.23: 自動車の最高速度 $v_{max} = 13$ km/h で乗り捨て区間が 1.5-2km

図 5.24: 自動車の最高速度 $v_{max} = 13$ km/h で乗り捨て区間が 2-2.5km

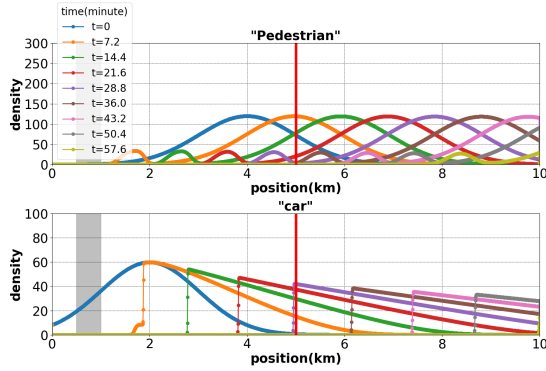


図 5.25: 自動車の最高速度 $v_{max} = 15\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 0.5-1km

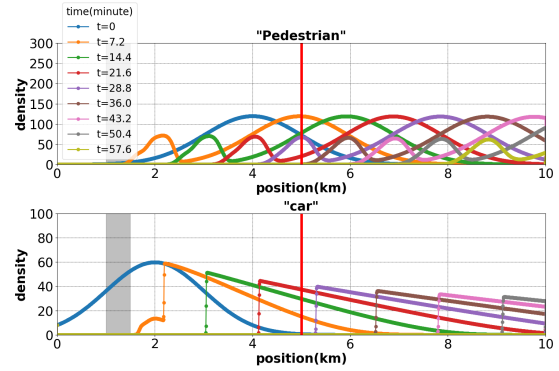


図 5.26: 自動車の最高速度 $v_{max} = 15\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 1-1.5km

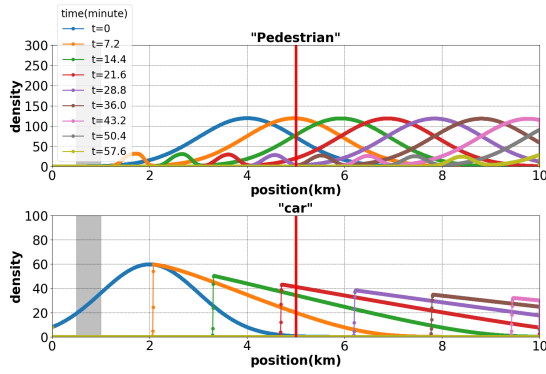


図 5.27: 自動車の最高速度 $v_{max} = 19\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 0.5-1km

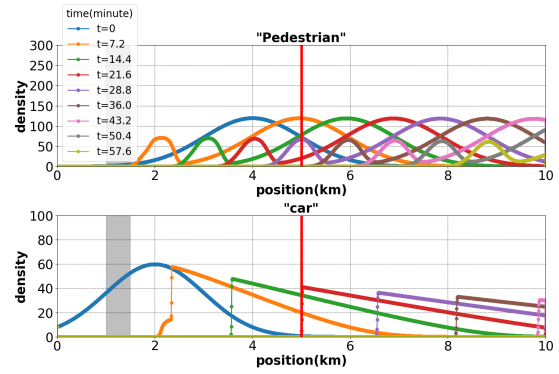


図 5.28: 自動車の最高速度 $v_{max} = 19\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 1-1.5km

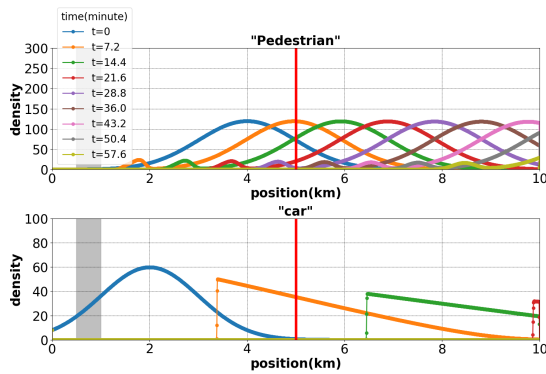


図 5.29: 自動車の最高速度 $v_{max} = 40\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 0.5-1km

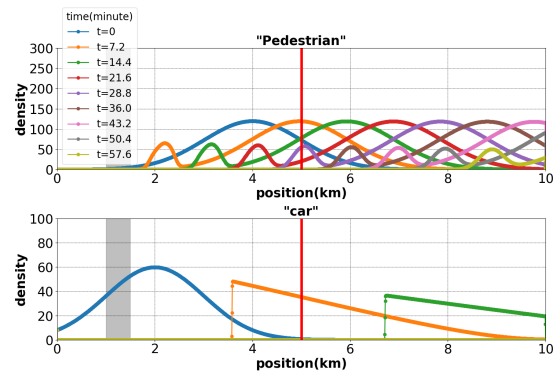


図 5.30: 自動車の最高速度 $v_{max} = 40\text{km/hour}$ で乗り捨て区間が 1-1.5km

これらの図の中で紫色のグラフは 28.8 分後を表しており、津波襲来時間である

30 分後に一番近い場合、紫色のグラフに注目して、 v_{max} の値によって死亡者数が 1 番多く、または少なくなる乗り捨て区間が異なる理由について考察していく。

$v_{max} = 10, 11$ の場合、 $v_{max} = 10$ の図 5.21 と図 5.22 からわかる通り自動車の速度がとても遅く、多くの人が自動車を乗り捨てても渋滞による自動車避難者の犠牲が生じている。また、歩行者のグラフを見ると、乗り捨て区間が 1.5-2km でも 2-2.5km でも、あまり死亡者数が変わらないように見える。よって、どれだけ多くの人乗り捨てて自動車の渋滞を解消し自動車避難者の避難成功率を上げるかが死亡者数の増減に大きく関わっていると考えられる。今、自動車の初期分布の中で最も密度が高いのは 2km 地点と設定しているため、 $v_{max} = 10, 11$ の場合に最も死亡者数が少なくなる乗り捨て可能区間 2-2.5km は最も密度が高い地点の少し先だということがわかる。乗り捨ては、乗り捨て区間を通過するときに行われるため、多くの自動車が乗り捨て区間を通過することは乗り捨て台数の増加につながる。つまり、今回はより多くの自動車が乗り捨て区間を通過し、多くの人が乗り捨てて、自動車避難者の犠牲を減らしたことが死亡者数の減少につながったと考えられる。

$v_{max} = 12, 13, 14$ の場合、 $v_{max} = 13$ の図 5.23 図 5.24 の紫色のグラフに注目すると、 $v_{max} = 10, 11$ ほど速度が遅くないため、それほど多くの人乗り捨てなくても自動車の渋滞で逃げ遅れ、犠牲になることは少ない。そのため自動車が安全に避難しきるために必要な台数以上に多くの人乗り捨ててしまうと単純に歩行者の犠牲が増加するだけとなる。そのため、最も密度が高いところの少し手前に乗り捨て可能区間があることで、 $v_{max} = 10, 11$ のときに比べて乗り捨て区間を通過する自動車も少なくなり、さほど多くの人乗り捨てずに、歩行者の犠牲の増加を阻止でき、かつ適度に自動車の速度も上げることができ、死亡者数の減少につながっていると考えられる。

$v_{max} = 15$ 以上の中でも $v_{max} = 15-20$ は比較的速度が遅い。0.5-1km で乗り捨てが行われると、安全な場所から遠い位置にいる徒歩避難者が多くなるため、逃げ切れない徒歩避難者が増加し、死亡者数も増加する。一方で乗り捨て区間が 1-1.5km では、乗り捨て区間が 0.5-1km の時ほど遠い位置に徒歩避難者が存在することはないが密度の高さと速度の遅さにより、少し時間が経ってからその区間を通過し乗り捨てる自動車が存在する。つまり、避難時間が少ないのに遠い場所から徒歩での避難スタートとなることを意味する。そのため比較的小さい v_{max} の値が小さい場合は、乗り捨て区間が 0.5-1km のときと、1-1.5km のときでは死亡者数は変わらず、どちらも多いという結果になると考えられる。

一方で $v_{max} = 40$ の場合は比較的自動車の速度が速い。上記と同様に海岸に近い位置に乗り捨て区間があればあるほど、安全な場所から遠い位置にいる徒歩避難者が多くなるため、逃げ切れず死亡者数が増加することになる。一方で $v_{max} = 15-20$ の時は、速度が遅いため、乗り捨て区間が海岸に近くなくてもその区間をゆっくりと通過した自動車が、少し時間が経ったときに乗り捨て、徒歩避難者となった人が逃げ遅れていた。しかし、速度が速いと海岸から離れた乗り捨て区間を通過する時刻も早くなるため徒歩での避難時間も確保でき、海岸から離れた乗り捨て区間で乗

り捨てたとしてもその位置から徒歩で時間内に逃げ切れる可能性が高い。そのため、速度が速ければ速いほど、乗り捨て区間が海岸に近い方が死亡者数が増えると考えられる。

5.2 λ_0 を変化させたとき

本節では λ_0 を変化させたときの死亡者数を比較し、死亡者数が最も少なくなるような λ_0 の値を明らかにすることを目指す。死亡者数の定義は前節と同様に、地震発生から 30 分後に 5km の地点より海岸側にいた人の合計とする。 λ_0 が大きいと乗り捨てる人数が多くなり、速度の遅い歩行者が多くなる。一方で、 λ_0 が小さいと乗り捨てる人数が少なくなり、自動車が渋滞しやすくなる。つまり、死亡者数が最も少なくなるような λ_0 の値とは、適度に自動車の渋滞を抑えることで自動車の速度を上げつつ、速度の遅い歩行者が極端に増えないときである。

λ_1 が 0 の時は、前方の密度が 0 ならば乗り捨てない、 λ_1 が 0 より大きければ、前方の密度が 0 でも乗り捨てることもあり得るということを意味する。乗り捨てという行為が避難訓練などに取り入れられるなどして人々に普及していれば後者のパターンも考えられるが、今回は $\lambda_1 = 0$ とし、前方の密度が 0 ならば乗り捨てないとする。

5.2.1 計算条件

計算条件は以下の表 5.3 の通りである。乗り捨て区間と自動車の最高速度については、それぞれ前節で乗り捨てが死亡者数減少に有効的であった 2.5-3km と 10km/hour として考える。

空間の長さ（道の全長） L	10(km)
空間の分割数（ nx ）	2000
時間（ T ）	1(hour)
時間の分割数（ nt ）	10000
歩行者の密度の初期分布	平均 4, 分散 1 の正規分布の値をすべて $\times 300$
自動車の密度の初期分布	平均 2, 分散 1 の正規分布の値をすべて $\times 150$
歩行速度（ u ）	8(km/hour)
自動車の最高速度（ v_{max} ）	10(km/hour)
自動車の最高密度（ $f_{2,max}$ ）	120(vehicle/km)
1 台の自動車に乗っている人数（ p ）	2(people/vehicle)
λ_0	0（乗り捨てなし）, 0.001, 0.005 0.01, 0.05, 0.1, 0.5
λ_1	0
どれだけ先の密度情報を考慮するか（ l ）	100 セル（約 67m）
乗り捨て区間	2.5-3km
津波の最終到達地点	海岸から 5km
津波の襲来時刻	地震発生から 30 分後

表 5.3: λ_0 を変化させるときの計算条件

5.2.2 結果

図 5.31 は λ_0 の値と死亡者数の関係を表している。横軸が左から $\lambda_0 = 0$ （乗り捨てなし）, 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 縦軸が死亡者数を表す。横軸の目盛りが見にくいため、図中の四角の中に横軸の数値を改めて記載している。

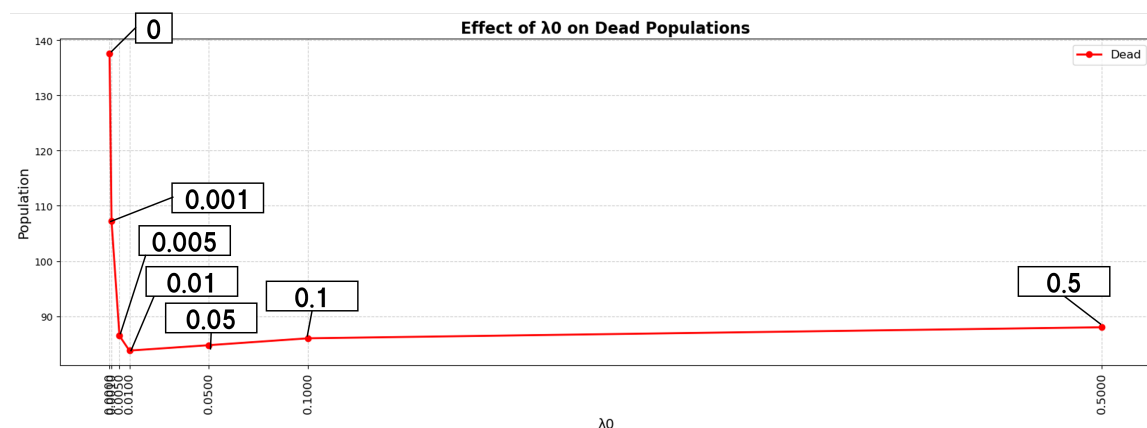


図 5.31: λ_0 と死亡者数の関係。横軸が λ_0 , 縦軸が死亡者数を表す。

図から $\lambda_0 = 0.01$ の時が最も死亡者数が少なく, $\lambda_0 = 0.001$ の時が最も死亡者数

が多い結果となることがわかる。つまり、 λ_0 が 0.01 より大きいと、自動車の渋滞は回避されるが、速度の遅い歩行者が多くなり、死亡者が増える。一方で λ_0 が 0.01 より小さいと、歩行者はそれほど多くなならないが、自動車の密度が高いままで、自動車の速度が遅くなるということがわかる。

λ_0 の定性的な意味について述べると、 λ_0 が大きい時は乗り捨てやすい時であり、乗り捨て場の入り口が広いことや、人々がパニックにならず順調に乗り捨てられている場合等を意味する。一方で λ_0 が小さいときは乗り捨てにくいときであり、乗り捨て場の入り口が狭いことや、パニックで入口が混雑している状態等を意味する。大きなイオンモールの駐車場であったとしても、駐車場の入り口は基本、自動車 1・2 台が通れる広さである上に、災害時に人々が冷静を保ちながら順調に乗り捨てられるとは考えがたいため、 λ_0 が小さいときの方が現実には近いと考えられる。上記の結果から λ_0 が小さく乗り捨てにくくても死亡者数が多くなるが、大きすぎて乗り捨てやすすぎても死亡者数がかえって増えるため、とても乗り捨てやすいという状況を作らなくてもよいことがわかる。ある程度の乗り捨てやすさがある状態が一番死亡者数を減らすことができるため、災害時に乗り捨て場となる場所の周りを地中に仕舞える柵で囲い、災害時以外は柵として出しておき、災害時は柵を地中に仕舞うことで乗り捨て場への入り口を広げるなどの対策が考えられる。

乗り捨て場の入り口の広さの他に、パニックや混乱など人々の心理面によっても λ_0 が小さくなりうる点に関しては、自動運転の普及が一役買うと考えられる。自動運転が普及し災害時や緊急時の自動車の動きを一元管理できるような世界になったら、避難者がパニックになり乗り捨て場が混乱したり、よくないタイミングや場所で乗り捨てることも少なくなり、自動車の乗り捨てがより避難手段として有効になるのではないか。

5.3 宮城県東松島市での適用例

ここでは本研究で構築したモデルを実際の状況に近い条件で適用し、その土地に応じた乗り捨ての有効性を検証する。

石川県で適用しようと考えたが、石川県津波浸水想定区域図 ([34]) によると、一番広範囲が浸水するとされている地域でも 3km ほどの浸水領域である上に、海に流れ出る河川沿いが浸水想定となっている。そのため、津波の襲来が直接被害を与えるというより、津波により河川の氾濫から溢れた水によって被害が広がることが予想される地域だと考えられ、津波の直接被害を想定している本モデルを適用するには不向きである。そこで、今回は東日本大震災で甚大な津波被害を受けた宮城県東松島市を例に、乗り捨ての有効性について議論していこうと思う。

今回は宮城県東松島市に適用するが、以下の 3 点を変更すればどの経路にも適用できる。

1. 車と歩行者の初期分布

2. 乗り捨て場の位置
3. 避難経路（道路）の長さ

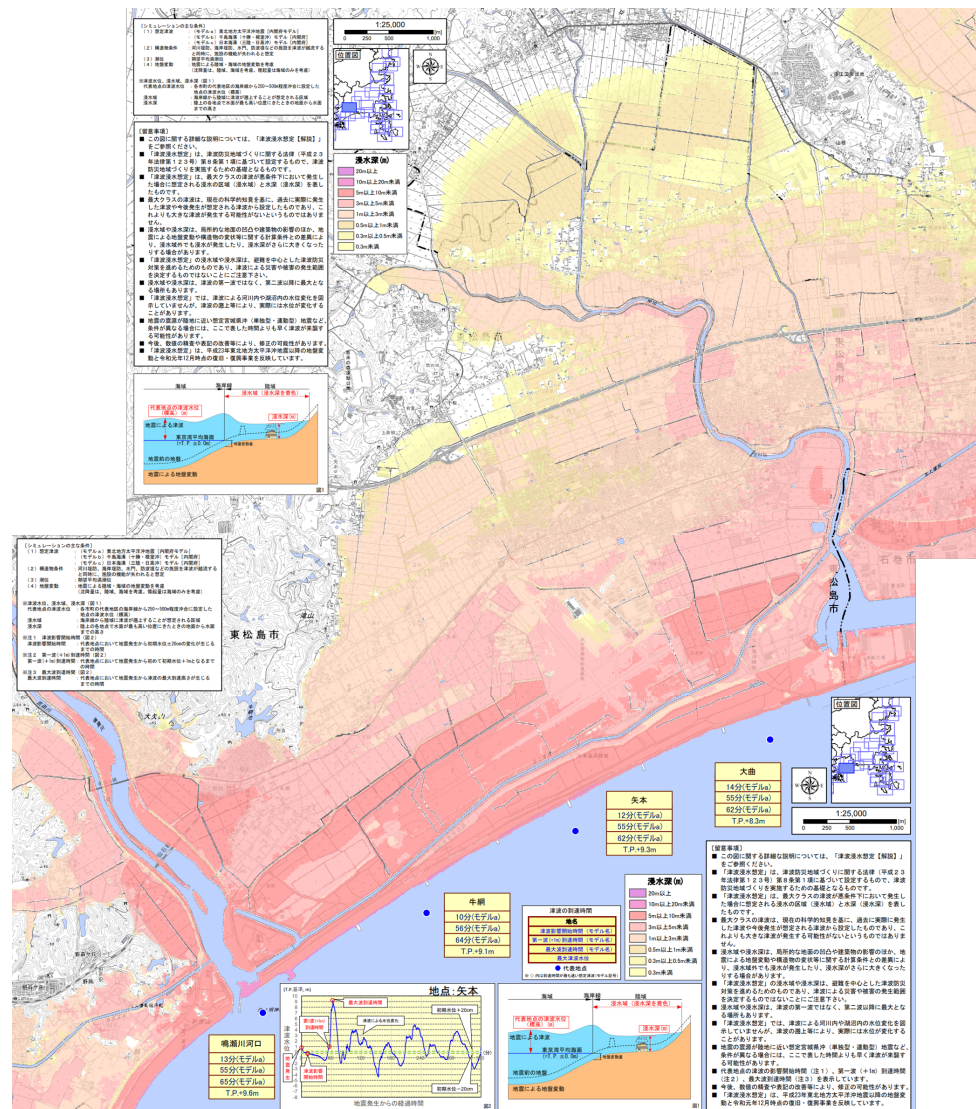
5.3.1 計算条件

計算条件は表 5.4 の通りである.

空間の長さ（道の全長） L	10(km)
空間の分割数（ nx ）	2000
時間（ T ）	1(hour)
時間の分割数（ nt ）	10000
歩行者の密度の初期分布（昼間）	0-1km:0（人/km） 1-2km: 約 125 2-4km: 約 375 4-10km: 約 125
自動車の密度の初期分布（昼間）	0-1km:0（台/km） 1-2km: 約 62 2-4km: 約 187 4-10km: 約 62
歩行者の密度の初期分布（夜間）	0-1km:0（人/km） 1-2km: 約 125 2-4km: 約 625 4-10km: 約 125
自動車の密度の初期分布（夜間）	0-1km:0（台/km） 1-2km: 約 62 2-4km: 約 312 4-10km: 約 62
歩行速度（ u ）	8(km/hour)
自動車の最高速度（ v_{max} ）	10(km/hour)
自動車の最高密度（ $f_{2,max}$ ）	120(vehicle/km)
1 台の自動車に乗っている人数（ p ）	2(people/vehicle)
λ_0	0.01
λ_1	0
どれだけ先の密度情報を考慮するか（ l ）	100 セル（約 67m）
乗り捨て区間	4.5-5km
浸水深 1m 以上の地域	海岸から 6km 以内
津波の襲来時刻	地震発生から 30 分後

表 5.4: 宮城県東松島市の計算条件

以下の図 5.32 は東松島市の津波浸水想定図であり、分かれて記載されていた図を重ねたものである。海岸から 10km 近くまで浸水想定となっており、その中でも浸水深が 1m 以上となるのは海岸から 6km 以内だということがわかる。本節では浸水深が 1m 以上となる津波に襲われた場合に死亡するとする。つまり、30 分後に海岸から 6km 以内に存在する人の合計を死亡者数とする。また、図 5.33 は今回想定する避難経路であり、海岸に近いアイザワ水産工場から石巻ロイヤル病院まではほぼ直線の 10.3km の経路が示されている。乗り捨て区間については、イオンモールの



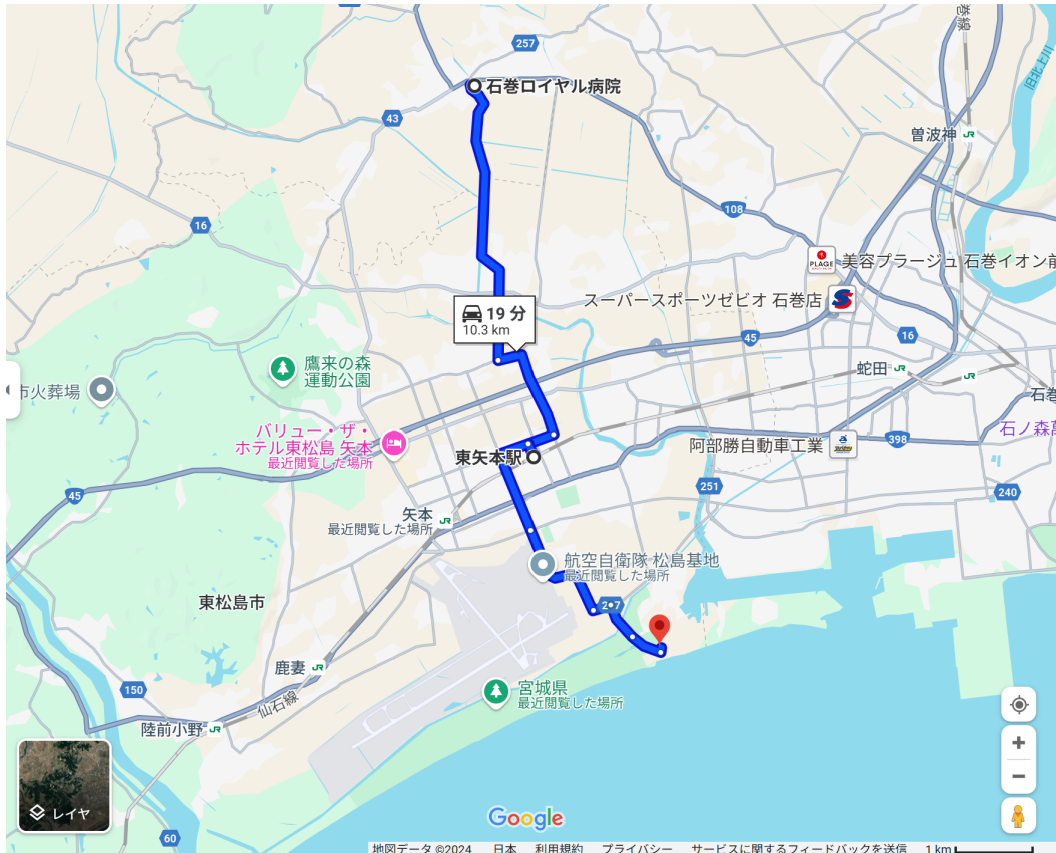


図 5.33: 想定する避難経路（航空自衛隊松島基地から石巻ロイヤル病院まで）。（GoogleMap より引用。）

歩行者と自動車の密度の初期分布については、昼間と夜間で人口密度が異なるため、昼間に避難する場合と夜間に避難する場合の2パターンに分けて考える。今回は宮城県東松島市の昼間人口密度と夜間人口密度についての統計データ（参考文献 [6][5]）を参考にする。昼間人口密度は以下の図 5.34、夜間人口密度は図 5.35 の通りである。薄いオレンジが人口密度 0-20 人/ha（= 0-2000 人/km²）、濃いオレンジが人口密度 20-40 人/ha（= 2000-4000 人/km²）、赤が人口密度 40-人/ha（= 4000-人/km²）を表している。本研究ではわかりやすくするために薄いオレンジが人口密度 10 人/ha（= 1000 人/km²）、濃いオレンジが人口密度 30 人/ha（= 3000 人/km²）、赤が人口密度 50 人/ha（= 5000 人/km²）としている。高さは人口（人）を表すが、今回は高さを無視して、人口密度だけを参考にしてしている。図からは東矢本駅周辺の人口密度が比較的高く、その他の地域は人口密度が低いことがわかる。また、東矢本駅周辺は住宅街なため昼間人口より夜間人口の方が多い。

人口密度の値は、人/km² であるが、1km² に存在する人すべてが同じ道路を使用して避難するわけではない。しかし特定の道路を実際に利用した人数はわからないため、今回は 1km² に存在する人口のうち、約 1/4 の人が今回設定した道路を使って避難すると仮定する。また、今後想定する避難手段についてのアンケート結果を

まとめた図 1.5 を参考に、徒歩避難者と自動車避難者の人数を同じ比率とみて値を設定する。初期分布は密度に応じてカスタムするために、ランダムに発生させた乱数を密度に応じて受容するか否かに分け、その累積で分布を作る。

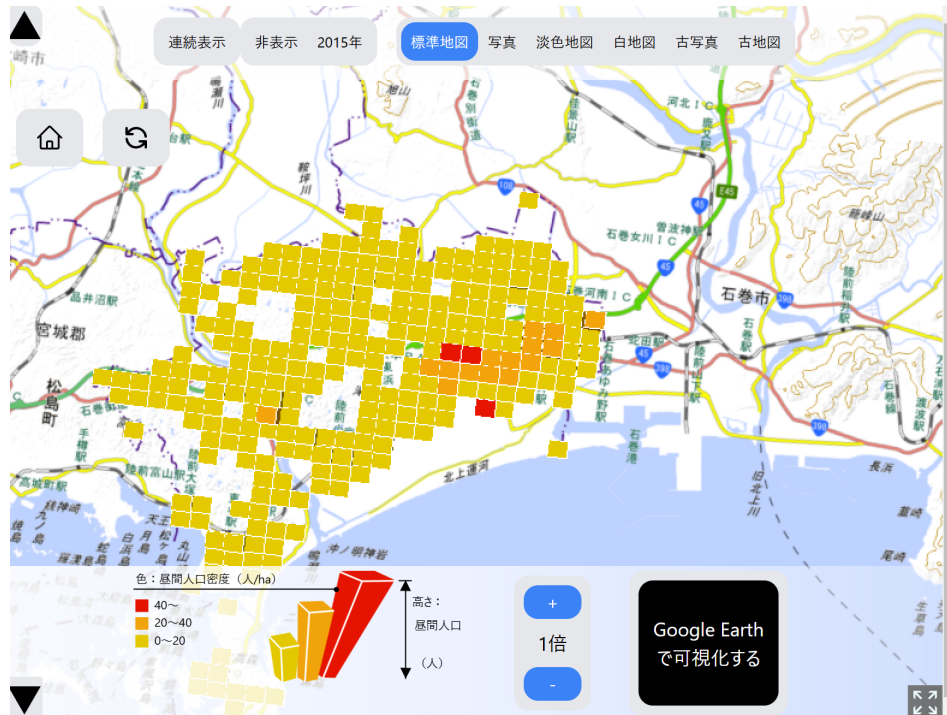


図 5.34: 東松島市の昼間人口密度。薄いオレンジが人口密度 0-20 人/ha, 濃いオレンジが人口密度 20-40 人/ha, 赤が人口密度 40-人/ha. （参考ページ [5] より引用.）

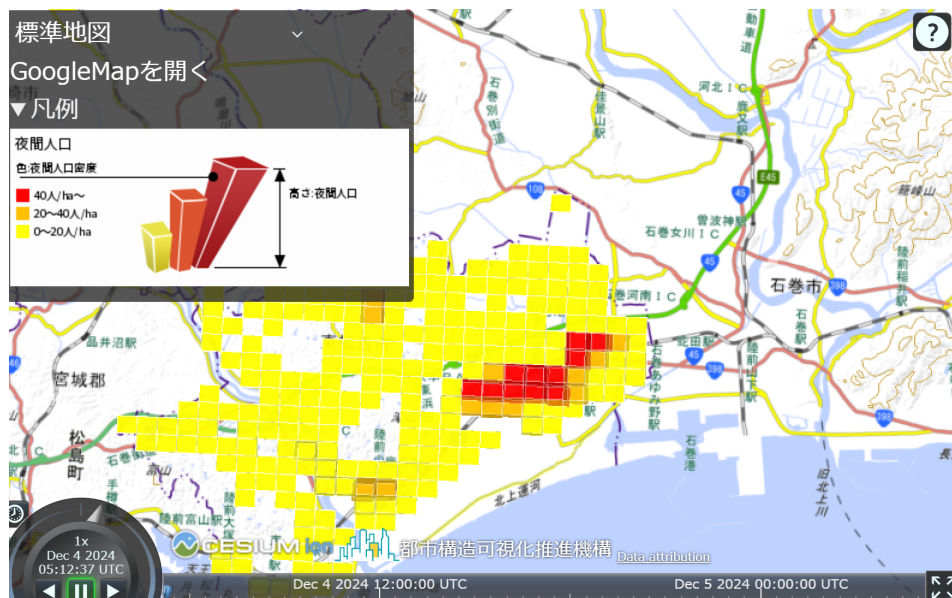


図 5.35: 東松島市の夜間人口密度. 黄色が人口密度 0-20 人/ha, 濃いオレンジが人口密度 20-40 人/ha, 赤が人口密度 40-人/ha. (参考ページ [6] より引用.)

以上の人口密度や津波浸水情報, 乗り捨て区間等をまとめた地図を以下に示す. 図 5.36 は昼間の情報を, 図 5.37 は夜間の情報をまとめたものである. 図の右側に津波浸水情報を, 左側に人口密度を記載してある.



図 5.36: 昼間人口密度や津波浸水状況の情報をまとめた地図. (GoogleMap より引用.)



図 5.37: 夜間人口密度や津波浸水状況の情報をまとめた地図. (GoogleMap より引用.)

本モデルでは自動車の密度が 120 台/km を超えてしまうと自動車の速度の式の形上, 速度がマイナスになってしまう. これまでの計算条件では自動車の密度が最大密度である 120 台/km を超えなかったため, 自動車の速度が 0km/hour 以下になることはなかったが, 今回の条件では速度がマイナスになる部分が出てきてしまう. そのため自動車の密度が 120 台/km 以上になると速度はマイナスにはならず 0 になり, かつ一度止まるとそれ以降動かないということがないように, 密度が 120 台/km を超えていたとしても, もし前方の密度が 120 台/km 以下で空きがあるのならばその分だけ進めるようにする. その時, 前方に進む速度は 5km/hour と仮定する.

5.3.2 結果

以下の図 5.39 は乗り捨てなしのときの, 東松島市の昼間人口分布に基づく海岸からの距離と密度の関係, 図 5.39 は乗り捨て可能区間を 4.5-5km に設けたときの, 東松島市の昼間人口分布に基づく海岸からの距離と密度の関係, 図 5.40 は乗り捨てなしのときの, 東松島市の夜間人口分布に基づく海岸からの距離と密度の関係, 図 5.41 は乗り捨て可能区間を 4.5-5km に設けたときの, 東松島市の夜間人口分布に基づく海岸からの距離と密度の関係を表したものである.

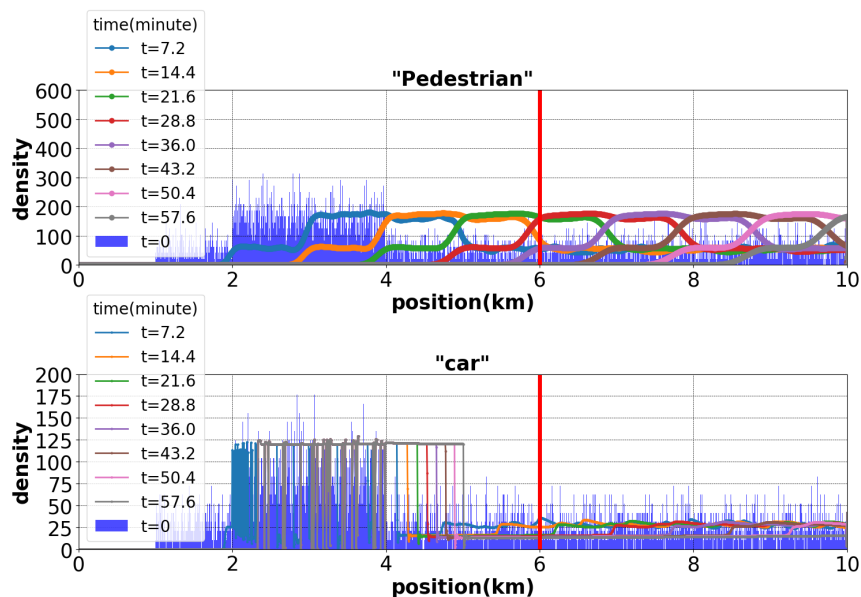


図 5.38: 乗り捨てなしのときの, 東松島市の昼間人口分布に基づく海岸からの距離と密度の関係. 上が歩行者, 下が自動車のグラフ. グラフの色は地震発生からの時間を表す. 赤線は津波の浸水深が 1m 以上もしくは 1m 以下のラインであり, 津波に吞まれて死亡するか否かのラインを示す.

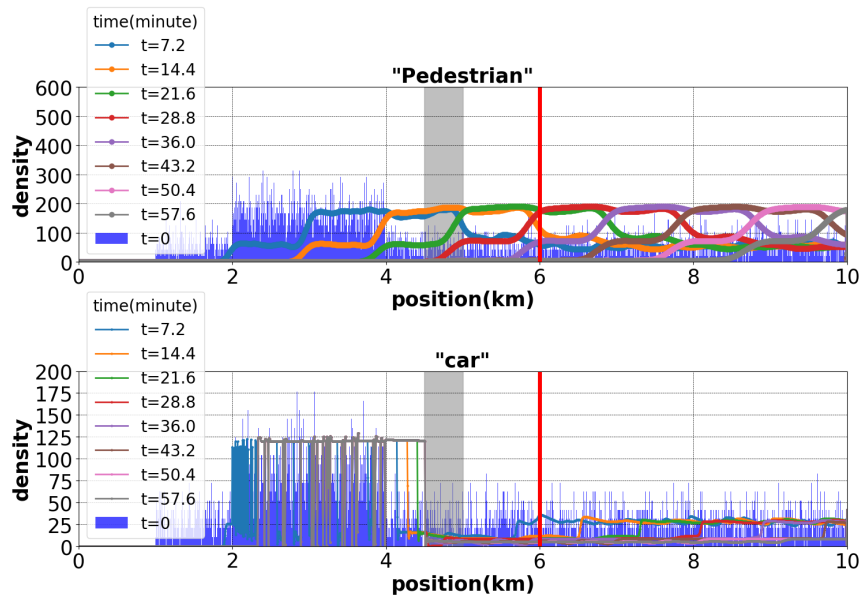


図 5.39: 乗り捨て可能区間を 4.5-5km に設けたときの, 東松島市の昼間人口分布に基づく海岸からの距離と密度の関係.

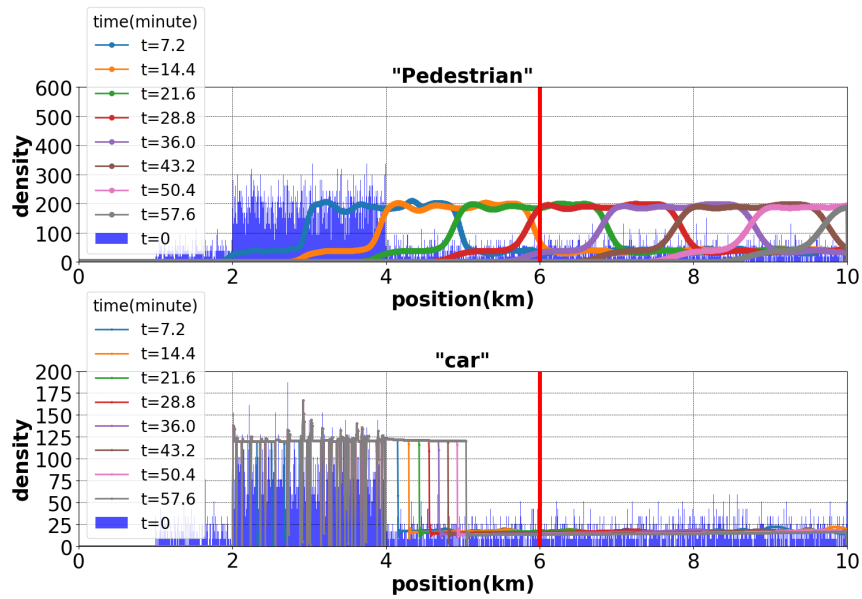


図 5.40: 乗り捨てなしのときの, 東松島市の夜間人口分布に基づく海岸からの距離と密度の関係.

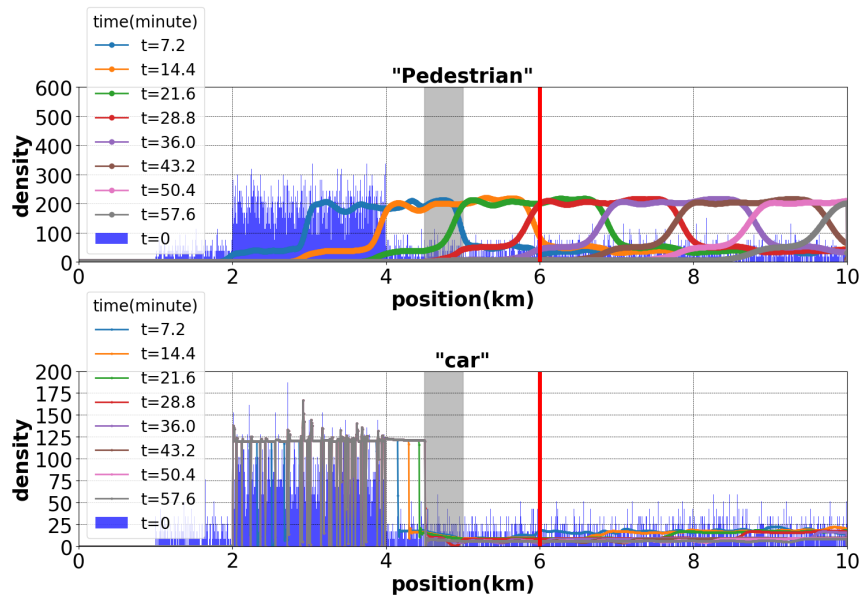


図 5.41: 乗り捨て可能区間を 4.5-5km に設けたときの、東松島市の夜間人口分布に基づく海岸からの距離と密度の関係。

死亡者数は、乗り捨てなしの昼間が約 621 人、乗り捨て可能区間を 4.5-5km に設けたときの昼間が約 604 人、乗り捨てなしの夜間が約 682 人、乗り捨て可能区間を 4.5-5km に設けたときの夜間が約 657 人という結果になった。乗り捨て区間を 4.5-5km に設けることができた場合、昼間も夜間も乗り捨てることで死亡者数は減少することがわかる。図 5.38 と図 5.39 を比べると、乗り捨てなしの場合は、東矢本駅周辺で自動車が混み合い、時間が経っても東矢本駅周辺から前に進めない人たちがいることがわかる。一方で乗り捨てありの場合は、東矢本駅周辺で混み合っているが乗り捨てによって密度が下がる部分が出てくることで、時間が経てば前に進み、東矢本駅周辺から動けないという状況にはならないため、乗り捨てによって死亡者数が少なくなったと考えられる。図 5.40 と図 5.41 から、東矢本駅周辺の人口密度がかなり高い夜間では、乗り捨てありの場合でも東矢本駅周辺から自動車で避難を開始した人々が渋滞で立ち往生する可能性が高く、乗り捨てにより密度が下がり、前方に空きがあれば進める状況ができて東矢本駅周辺から出られなくなってしまう。そのため、乗り捨てによって死亡者数を減らすことはできるが、自動車の密度が高すぎると乗り捨てありの場合でもその場から動けない自動車が存在し、危険であることがわかる。そのような場合は、自動車避難の規制をかけるなど、乗り捨て以外の施策を掛け合わせる必要がある。

今の計算条件である $v_{max} = 10$ では乗り捨てによって死亡者数が減少することがわかったが、 v_{max} が大きくなっても乗り捨てが死亡者数の減少に有効なのか、それとも乗り捨てにより死亡者数が増加する v_{max} の閾値があるのかについて以下に結果と考察を述べる。5.1 節では、自動車の最高速度が $v_{max} = 14$ 以下のときに乗り捨て

てが有効で、 $v_{max} = 15$ 以上のときに有効ではないという結果であった。図 5.42 は東松島市の昼間人口密度を参考に徒歩避難者と自動車避難者の初期分布を設定、図 5.43 は夜間人口密度を参考に徒歩避難者と自動車避難者の初期分布を設定したものをを用いて、自動車の最高速度 v_{max} ごとの乗り捨ての有無と死亡者数の関係を示したものである。 $v_{max} = 10, 20, 30, 40, 50$ の時について横軸を v_{max} 、縦軸を死亡者数、2つのグラフをそれぞれ乗り捨てなし（青色）と乗り捨てあり（4.5-5km）（オレンジ色）とする。

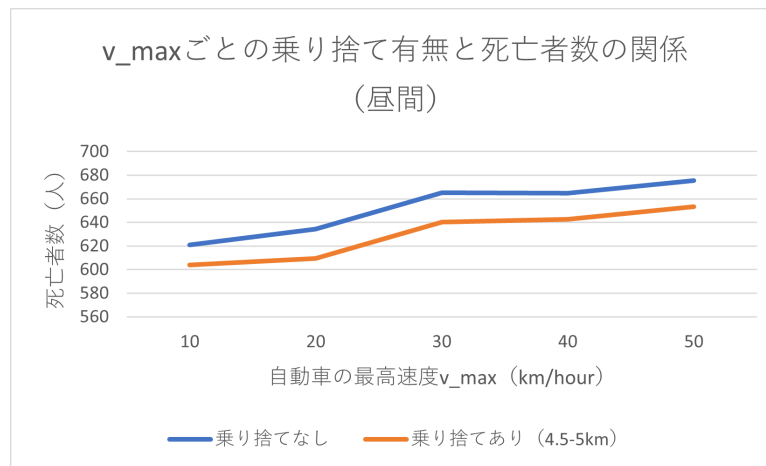


図 5.42: 自動車の最高速度 v_{max} ごとの乗り捨ての有無と死亡者数の関係（昼間）。横軸を v_{max} 、縦軸を死亡者数としている。青色のグラフは乗り捨てなし、オレンジ色のグラフは乗り捨てあり（4.5-5km）を表す。

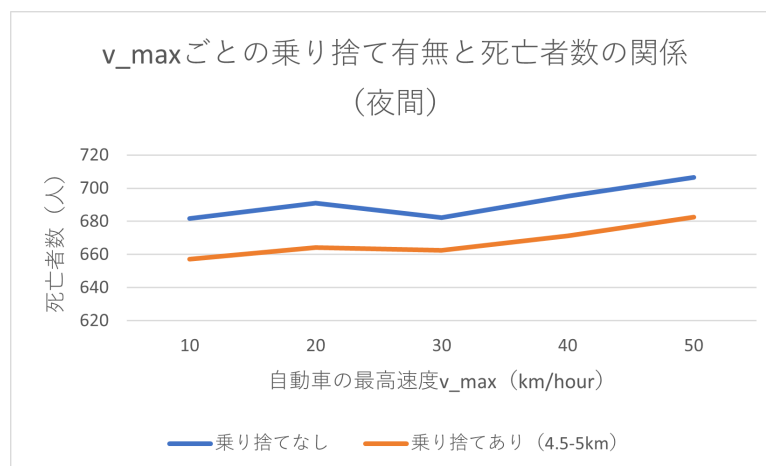


図 5.43: 自動車の最高速度 v_{max} ごとの乗り捨ての有無と死亡者数の関係（夜間）。横軸を v_{max} 、縦軸を死亡者数としている。青色のグラフは乗り捨てなし、オレンジ色のグラフは乗り捨てあり（4.5-5km）を表す。

以上の図から昼間夜間両方とも、自動車の最高速度を大きくした場合でも乗り捨て

てが死亡者数の減少に有効であることがわかる。これまでの初期分布では自動車の密度はそれほど高くなく、自動車の速度がほとんど0になるほどの渋滞は起こっていなかったため、自動車の最高速度が大きくなればなるほど進む速度も速くなっていた。しかし、今回の初期分布では自動車の密度が非常に高く渋滞が甚だしい状況であり、最高速度が大きくても自動車は前に進むことができない。そのため、今回は自動車の最高速度はあまり関係がなく、乗り捨てを行うか否かが一番重要である。よって、今回の場合は自動車の最高速度がどれだけであろうと、乗り捨てを行う場合は必ず死亡者数が減少するという結果になったと考えられる。

また本研究で用いた偏微分方程式に基づくモデルはマクロな現象に対応するものなため、本節のようなギザギザした現象ととらえるのには不向きである。そのため、ミクロモデルでより詳しく自動車の挙動をシミュレーションすることで乗り捨ての有効性をより検証できると考えられる。

第6章 結論

6.1 まとめ

本研究は避難手段の1つとして、初めは自動車で避難するが途中で乗り捨てて徒歩避難に変更するという“自動車乗り捨て”に着目し、津波避難時に自動車乗り捨てが死亡者数を減らすために有効かどうかを明らかにすることを目的とした。またパラメータの変化が結果にどのように影響するのか、自動車乗り捨てが有効であるならばその条件等を明らかにすることも目的としていた。方法としては移流方程式をベースとし、乗り捨てを表現できる数値モデルを構築し、1次精度風上差分法で離散化し、Pythonでシミュレーションを行った。

まずはじめに、自動車と歩行者の初期分布を正規分布と仮定し、道の全長10kmのうち、乗り捨て区間は2.5-3km, 3-3.5km, 3.5-4km, 4-4.5km, 4.5-5kmの5つとしてシミュレーションを行った。また本研究では津波の襲来時刻に、浸水するとされる領域に存在する人を死亡者と定義づけた。乗り捨て区間で自動車の密度が下がり、歩行者の密度が上がっていたことから本研究で構築モデルが乗り捨てを表現することがわかったが、乗り捨てない場合でも死亡者がほとんどおらず、乗り捨てが死亡者数の減少に有効かどうかはわからなかった。そこで、乗り捨てが有効になりそうな状況の1つとして、道路の損傷や余震、歩行者との交錯による安全運転などで自動車がそれほどスピードを出せないときを取り上げ、最高速度 v_{max} を小さくすることでその状況を再現した。 $v_{max} = 10 \sim 20, 40$ の場合についてそれぞれの乗り捨て区間（0-0.5km, 0.5-1km, 1-1.5km, 1.5-2km, 2-2.5km, 2.5-3km, 3-3.5km, 3.5-4km, 4-4.5km, 4.5-5kmの10パターン）と死亡者数の関係を出した結果、 $v_{max} = 14$ 以下の時は、どこに乗り捨て区間を設けても、乗り捨てがない時に比べて死亡者数が減少し、 $v_{max} = 15$ 以上の時は、どこに乗り捨て区間を設けても死亡者数は減少するどころか増加することがわかった。また、 $v_{max} = 10, 11$ の時は乗り捨て区間が2-2.5kmの時に死亡者数が最も少なくなり、 $v_{max} = 12, 13, 14$ の時は乗り捨て区間が1.5-2kmの時に死亡者数が最も少なくなることがわかった。一方で、 $v_{max} = 15$ 以上の中でも $v_{max} = 15, 16, 17$ のときは乗り捨て区間が1-1.5kmのときに最も死亡者数が多くなり、 $v_{max} = 18, 19, 20, 40$ のときは乗り捨て区間が0.5-1kmのときに最も死亡者数が多くなった。しかし、 $v_{max} = 15, 16, 17$ の時でも乗り捨て区間が0.5-1kmの時の死亡者数と乗り捨て区間が1-1.5kmの時の死亡者数が1名程度しか変わらず、ほとんど同じ死亡者数であった。一方で $v_{max} = 40$ の時は圧倒的に乗り捨て区間が0.5-1kmのときに死亡者数が多かった。つまり、 $v_{max} = 15$ 以上のとき

は乗り捨て区間が0.5-1kmのときに死亡者数が最も多くなると結論付けられた。分布の形状と自動車の速度の式から最も速度が大きいところの値は最高速度の半分であることがわかるため、乗り捨てによって死亡者数が減少するようにするには、自動車が歩行者より遅くなる部分があるというのが最低限の必要条件であることがわかった。しかし、遅い部分があるからと言って乗り捨てによって助かる人数が増えるわけでもないため条件に応じてそのラインを探る必要がある。また、自動車の最高速度によっても乗り捨てが最も有効になる区間が異なるため、道路状況の予測等によってその土地に応じた乗り捨てのシミュレーションとともに計画を立てるべきである。

次に乗り捨てやすさを表す λ について、乗り捨てやすさに直接関係する係数である λ_0 の値を変化させたときの λ_0 と死亡者数の関係を調べ、最も死亡者数が少なくなる λ_0 の値を明らかにした。結果、乗り捨て可能区間を2.5-3km、 $v_{max} = 10$ とした場合、 $\lambda_0 = 0.01$ の時に最も死亡者数が少なく、 $\lambda_0 = 0.001$ の時に最も死亡者数が多い結果となった。 λ_0 が0.01より大きいと、自動車の渋滞は回避されるが、速度の遅い歩行者が多くなり、死亡者が増える一方で λ_0 が0.01より小さいと、歩行者はそれほど多くならないが、自動車の密度が高いままで、自動車の速度が遅くなる。これらから λ_0 は大きすぎても小さすぎてもよくないことがわかった。

最後に現実世界にモデルを適用した例として、宮城県東松島市を例にとってシミュレーションを行った。乗り捨て場は田んぼが広がる4.5-5kmに大きなイオンモールを建設するとし、乗り捨てありと乗り捨てなし、夜間と昼間に分けてそれぞれシミュレーションを行った。結果、自動車の最高速度がどれだけであろうと昼間も夜間もどちらも乗り捨てを行うことによって死亡者数が減少することが分かり、現実世界での乗り捨ての可能性を見出すことができた。しかし、東矢本駅周辺では夜間の人口密度がかなり高く、乗り捨てを行ったとしても東矢本駅周辺から抜け出せない自動車が多く存在した。そのため、自動車避難者数の規制など、乗り捨て以外の施策と掛け合わせる必要があると考えられる。

本研究では、これまでの研究であまり触れられていなかった避難時の自動車乗り捨てに焦点を当ててきたが、自動車が出せる最高速度や人口密度分布によっては自動車使用率を減らすことなく、死亡者数を減らせることが明らかになった。しかし、道路が損傷しておらず自動車のスピードが出せる状況ならば乗り捨てはかえって死亡者数の増加につながるため、その時の状況に応じて判断することが大切である。本研究の結果がこれからの避難計画や、道路計画、乗り捨て機能を持たせた大規模商業施設の誘致などの都市構造再編集中支援事業への一助となることを願っている。

6.2 研究の限界と今後の展望

本研究では、駐車場に自動車を駐車するのにかかる時間を0として計算しているが、実際には時間がかかる。また避難者がパニックの状況で、整列して自動車を駐

車するとも限らないため、想像以上に駐車場は混雑し混沌としているかもしれない。そのため、実際の避難実験等を通して、駐車にかかる時間や混雑具合をデータとして入手し、そのデータに合わせたモデルや計算条件に改良していきたい。また、本研究の λ の係数 λ_0 と λ_1 については、実際のデータに基づいた値ではないため、 λ_0 と λ_1 についても避難実験等を通して得られたデータを元に設定しなおしたい。

本研究では歩行者の速度を一定としているが、Mark R. Virkler, Sathish Elayadath (1994) [35] で述べられている歩行者の速度と密度の関係を参考に、歩行者の過密を加味した歩行者の速度の式を用いてモデルを再構築することも今後の課題とする。

また、本研究では基本モデルとして、自動車の速度がその地点の密度にのみ依存し、さらに、速度と密度の関係が一番シンプルな式(式 2.1)を利用した。時間や離散化方法の関係でこのモデルを選んだが、より実際のデータにフィットした式として、Yi Sun and Changhui Tan (2020), Yi Sun and Changhui Tan (2023) に記載されている、前方の密度情報を踏まえて速度が決まる式を利用すれば、より現実の車の渋滞を再現できると考えられる。その際には精度や安定性を確保した TVD 法などを使用する必要がある。今後は、基本モデルをより現実に近いものに変え、安定性と精度が確保された離散化方法を採用した上で、再度計算・検討したい。

本研究は1車線で考えているが、今後は Harold Deivi Contreras ら (2024) [36] を参考に2車線にモデルを拡張したい。

p について本稿では2と固定しているが、 p の値を変化させたときの乗り捨ての有効性についても今後議論したい。

今回は時間の都合上、安定性の解析などは行っていないが、偏微分方程式で交通流モデルを構築することのメリットの1つとして、そういった数学的な解析が行えることが挙げられるため、将来は構築したモデルからわかることをより詳しく解析していきたい。

実際に避難するにあたっては、早く乗り捨てたい・早く避難したいといった人間の心理が少なからず影響する。本研究では λ の値を変えることで多少は考慮できているが、より詳しく考慮するにはエージェントベースモデルなどのマイクロモデルを用いる方がよい。本研究では条件によっては乗り捨てによって死亡者数を減らすことができることがわかったため、信号や駐車場の混雑具合、他人より自分が乗り捨てられることを優先しようとする心理などを考慮したモデル構築により、さらに細かく乗り捨ての有効性について検討したい。また、宮城県東松島市のシミュレーションでは自動車が最大密度以上の密度になる部分が存在していた。そのような状況では前方の状況を見て路肩に駐車したり、徒歩に変えたり、状況を見て判断することも多い。また宮城県東松島市のシミュレーションの際に設定した分布はギザギザしており、よりマクロモデルには向かない。そのためエージェントベースモデルにより細かい状況判断を導入したり、点在する人口分布についても再現したいと考えている。

5.1 節では歩行者と自動車の初期分布として正規分布を採用したが、ある空間や

時間の人の発生を表すポアソン分布でシミュレーションを行う方が適切とも考えられるため、今後はポアソン分布でのシミュレーションを行いたい。また、自動車の最高速度を変化させて乗り捨てが死亡者数減少に有効となる最高速度を求める際、歩行者の速度を 8km/hour で一定としていた。その際、少なくとも自動車の速度が歩行者の速度より遅くなる部分が存在する必要があると結論付けたが、歩行者の速度が 8km/hour 以外でも同じ結果になるかどうかはわからない。そのため、歩行者の速度を変えて同じことが言えるのかを検証したい。歩行者の速度に関してはその土地の年齢分布等も参考にしてより現実に近い条件でのシミュレーションも行いたい。

また、本研究は津波避難時を想定しているが、津波以外の災害において自動車乗り捨てが死亡者数の減少につながるかはわからないため、今後は様々な災害で乗り捨ての有効性を検証したいと思っている。

関連図書

- [1] 内閣府（防災担当）．東日本大震災時の地震・津波避難に関する住民アンケート [主な調査結果], 2012. https://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/pdf/20121221_chousai1_1.pdf（最終閲覧日：2024/10/5）．
- [2] 奥村誠．自動車を利用した安全な津波避難方法を考える, 2018. <https://strep.main.jp/uploads/class/181101EvacuationPlan.pdf>（最終閲覧日：2024/10/6）．
- [3] M. Elena Vázquez-Cendón. *Solving Hyperbolic Equations with Finite Volume Methods*. Springer, 2015.
- [4] 宮城県．宮城県津波浸水想定図（石巻市 東松島市）. <https://www.pref.miyagi.jp/documents/39258/03ishinomaki-5.pdf>（最終閲覧日：2024/12/27）,
- [5] 都市構造可視化計画. 昼間人口総数（2015）. <https://mieruka-v4.kashika.net/population-daytime-2015/>（最終閲覧日：2024/12/9）．
- [6] 都市構造可視化計画. 人口総数（2015）. <https://mieruka-v4.kashika.net/population-2015/>（最終閲覧日：2024/12/9）．
- [7] 三好隆博．差分法の基礎. http://www.icehap.chiba-u.jp/activity/SS2019/textbook/miyoshi_SS2019_FD.pdf（最終閲覧日：2024/10/6）．
- [8] 総務省消防庁．2.2 津波の概要. https://www.fdma.go.jp/disaster/higashinihon/item/higashinihon001_05_02-02-01.pdf（最終閲覧日：2024/11/23）．
- [9] 金沢市. 金沢市パーク・アンド・ライド駐車場. <https://www4.city.kanazawa.lg.jp/soshikikarasagasu/kotsuseisakuka/gyomuannai/1/4/8014.html>（最終閲覧日：2024/10/5）．
- [10] 内閣府（防災担当）．自動車で安全かつ確実に避難できる方策, 2012. <https://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/5/pdf/3.pdf>（最終閲覧日：2024/10/6）．

- [11] 八戸市. 八戸市津波避難計画改定（令和 4 年 11 月）の概要. <https://www.city.hachinohe.aomori.jp/material/files/group/47/gaiyou.pdf>（最終閲覧日：2024/10/6）.
- [12] 関谷直也. 東日本大震災における「避難」の諸問題にみる日本の防災対策の陥穽. 土木学会論文集（特集号）, Vol. 4, pp. $l_1 - -l_{11}$, 2012.
- [13] 竹居広樹, 奥村誠. 歩車混合避難における津波遭遇リスクと交通事故リスク. 交通工学論文集（特集号）, Vol. 68, pp. $A_129 - -A_137$, 2018.
- [14] 石川県. いしかわの土木 2024. https://www.pref.ishikawa.lg.jp/kanri/i_doboku/documents/i_doboku_2024.pdf（最終閲覧日：2024/10/6）.
- [15] 国土交通省. 都市構造再編集集中支援事業. <https://www.mlit.go.jp/toshi/content/001735611.pdf1>（最終閲覧日：2024/1/17）.
- [16] Martin Treiber and Arne Kesting. *Traffic Flow Dynamics*. Springer, 2013.
- [17] JAF. [q]acc（アダプティブ・クルーズ・コントロール）とは? <https://jaf.or.jp/common/kuruma-qa/category-construction/subcategory-structure/faq069>（最終閲覧日：2024/10/6）.
- [18] 国土技術政策総合研究所 道路交通研究部高度道路交通システム研究室（ITS 研究室）. Its とは. <https://www.nilim.go.jp/lab/qcg/about/index.html>（最終閲覧日：2024/10/6）.
- [19] 藤井孝藏, 立川智章. 流体力学の数値計算法. オーム社, 2021.
- [20] G.B.Whitham. *Linear and Nonlinear Waves*. Wiley-Interscience, 1974.
- [21] Harold Greenberg. An analysis of traffic flow. *Oper. Res*, Vol. 7, pp. 79–85, 1959.
- [22] Yi Sun and Changhui Tan. On a class of new nonlocal traffic flow models with look-ahead rules. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 413, p. 132663, 2020.
- [23] Yi Sun and Changhui Tan. Accelerated kinetic monte carlo methods for general nonlocal traffic flow models. *Physica D*, Vol. 446, p. 133657, 2023.
- [24] 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. 交通工学研究発表会論文集, Vol. 37, pp. 239–245, 2017.
- [25] H. Wang, A. Mostafizi, L.A. Cramer, D. Cox, and H. Park. An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: decision-making and life safety. *Transp. Res. C Emerg. Technol*, Vol. 64, p. 86–100, 2016.

- [26] Z. Wang and G. Jia. A novel agent-based model for tsunami evacuation simulation and risk assessment. *Nat. Hazards*, Vol. 105, p. 2045–2071, 2021.
- [27] Ruchika Lochab and Vivek Kumar. A comparative study of high-resolution methods for nonlinear hyperbolic problems. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, Vol. 102, pp. 1–27, 2022.
- [28] 姫野武洋. 高分子レオロジーと成形加工 cae の基礎—その中身と周辺問題— (2) 差分法と有限体積法による数値. *成形加工*, Vol. 17, pp. 100–108, 2005.
- [29] 管理栄養士 健康運動指導士江夏. Vol.3 早歩きってどれくらいの速さ? <https://www.my-kenshin.jp/viewpdf.php?id=20170704153827&tmp=455680e00ec5e58c4a4ae210975a9baf> (最終閲覧日: 2024/10/6) .
- [30] Alireza Mostafizi, Haizhong Wang, Dan Cox, Lori A. Cramer, and Shangjia Dong. Agent-based tsunami evacuation modeling of unplanned network disruptions for evidence-driven resource allocation and retrofitting strategies. *Natl Hazards*, Vol. 88, pp. 1–24, 2017.
- [31] 国土交通省. V. データ活用編. https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/jyunryuudou/report_ja/h17_report09.pdf (最終閲覧日: 2024/10/6) .
- [32] 内閣府. 特集 東日本大震災. https://www.bousai.go.jp/kohou/kouhoubousai/h23/63/special_01.html (最終閲覧日: 2024/11/23) .
- [33] 大石雅之 (岩手県立博物館). 宮古市重茂半島川代の津波コマ撮り写真と姉吉の最大遡上高. <https://geosociety.jp/hazard/content0054.html> (最終閲覧日: 2024/11/30) .
- [34] 石川県. 石川県津波浸水想定の設定について. https://www.pref.ishikawa.lg.jp/bousai/bousai_g/tsunami/h28tsunami.html (最終閲覧日: 2024/11/23) .
- [35] Mark R. Virkler and Sathish Elayadath. Pedestrian speed-flow-density relationships. *Transportation Research Board*, Vol. 1438, pp. 51–58, 1994.
- [36] Harold Deivi Contreras, Paola Goatin, and Luis-Miguel Villada. A two-lane bidirectional nonlocal traffic model. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol. 543, pp. 1–24, 2024.

第7章 付録

本研究のモデルを用いて、海岸からの距離と密度の時系列変化のグラフを出力するコード

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy import stats
4
5 # 空間領域の設定
6 L = 10 # 空間の長さ(km)
7 nx = 2000 # 空間の分割数
8 dx = L / nx # 空間刻み幅
9
10 # 時間領域の設定
11 T = 1 # 時間(h)
12 nt = 10000 # 時間の離散化数
13 dt = T / nt # 時間刻み幅(h)
14
15 # スピードの設定
16 u = 8 # 歩行者の速度 (h/) km
17 vmax = 40 # 自動車の最大速度 (h/) km
18
19 qmax = 120 # 車の最大密度 veh/km
20
21 lam0 = 1 / 100
22 lam1 = 0
23 l = 100 # どれだけ先を見越すか (km*(L/nx))
24
25 p = 2 # 平均乗車人数
26
27 p1 = 0
28 p2 = 0 # 乗り捨て区間
29
30 norisute = 0 # 乗り捨てた人数のカウント
31 dead = 0 # 死亡者数のカウント
32 alive = 0 # 生存者数のカウント
33
34
35 # 密度分布の条件設定
36 mean_walk=4
37 var_walk=1
38 x_walk = np.linspace(0, L, nx)
39 q_walk = stats.norm.pdf(x_walk, loc=mean_walk,
```

```

40 scale=np.sqrt(var_walk))
41 q_walk *= 300
42
43 mean_car=2
44 var_car=1
45 x_car = np.linspace(0, L, nx)
46 q_car = stats.norm.pdf(x_car, loc=mean_car, scale=np.sqrt(var_car))
47 q_car *= 150
48
49
50 plt.figure(figsize=(15, 10)) # サブプロット全体の図のサイズを設定
51
52 # のグラフwalk
53 plt.subplot(2, 1, 1)
54 plt.plot(x_walk, q_walk, marker='o', lw=2, label='t=0')
55
56 # のグラフCAR
57 plt.subplot(2, 1, 2)
58 plt.plot(x_car, q_car, marker='o', lw=2, label='t=0')
59
60 lost=0
61
62 for n in range(1, nt + 1):
63     qold_car = q_car.copy()
64     qold_walk = q_walk.copy()
65
66     # 境界条件
67     qold_car[0] =0
68     qold_car[1]=0 # 左端
69     qold_car[-1] = 0 # 右端
70     qold_car[-2]=0
71
72     qold_walk[0] =0
73     qold_walk[1]=0 # 左端
74     qold_walk[-1] = 0 # 右端
75     qold_walk[-2]=0
76
77
78     for j in range(1, nx - 1):
79         total = 0
80         if p1 < j < p2: # 乗り捨て区間内
81             for i in range(j, min(j + 1, nx)):
82                 total += qold_car[i]
83             lam = lam0 * total # 乗り捨てやすさの値計算
84             norisute += dt * dx * qold_car[j] * p * lam
85             # 乗り捨てた人数カウント
86
87             q_walk[j] = qold_walk[j] - dt / dx * (qold_walk[j] * u
88                 - qold_walk[j - 1] * u) + p * lam * qold_car[j] * dt
89
90             q_car[j] = qold_car[j] - dt / dx * (qold_car[j] * vmax
91                 * (1 - qold_car[j] / qmax) - qold_car[j - 1] * vmax
92                 * (1 - qold_car[j - 1] / qmax))

```

```

93         - lam * qold_car[j] * dt
94
95     else: # 乗り捨て区間外
96         q_walk[j] = qold_walk[j] - dt / dx * (qold_walk[j] * u
97             - qold_walk[j - 1] * u)
98
99         q_car[j] = qold_car[j] - dt / dx * (qold_car[j] * vmax
100             * (1 - qold_car[j] / qmax) - qold_car[j - 1] * vmax
101             * (1 - qold_car[j - 1] / qmax))
102     if n == 5000 and j < 1000:
103         dead += q_walk[j] * dx + q_car[j] * p * dx
104     else:
105         alive += q_walk[j] * dx + q_car[j] * p * dx
106
107     lost += q_car[-2] * p + q_walk[-2]
108
109     if n % 1200 == 0:
110         # の密度グラフ更新Pedestrian
111         plt.subplot(2, 1, 1)
112         plt.plot(np.linspace(0, L, nx), q_walk, marker='o', lw=2,
113             label=f't={n * 0.006}')
114
115         # の密度グラフ更新car
116         plt.subplot(2, 1, 2)
117         plt.plot(np.linspace(0, L, nx), q_car, marker='o', lw=2,
118             label=f't={n * 0.006}')
119         print(f"{n * 分時点で乗り捨てた累計人数は0.006}{norisute人}")
120
121     print(f"生存者は"{alive}人")
122     print(f"死亡者は"{dead}人")
123     print(lost)
124
125     plt.subplot(2, 1, 1)
126     plt.axvspan(p1 * dx, p2 * dx, color='gray', alpha=0.5)
127     plt.axvline(x=5, color='red', linewidth=5)
128     plt.grid(color='black', linestyle='dashed', linewidth=0.5)
129     plt.xlim([0, L])
130     plt.ylim([0, 300])
131     plt.xticks(fontsize=25)
132     plt.yticks(fontsize=25)
133     plt.xlabel('position(km)', fontsize=25, fontweight='bold')
134     plt.ylabel('density', fontsize=25, fontweight='bold')
135     plt.legend(fontsize=20, title='time(minute)', title_fontsize=20)
136     plt.title('"Pedestrian"', fontsize=25, fontweight='bold')
137
138     plt.subplot(2, 1, 2)
139     plt.axvspan(p1 * dx, p2 * dx, color='gray', alpha=0.5)
140     plt.axvline(x=5, color='red', linewidth=5)
141     plt.grid(color='black', linestyle='dashed', linewidth=0.5)
142     plt.xlim([0, L])
143     plt.ylim([0, 100])
144     plt.xticks(fontsize=25)
145     plt.yticks(fontsize=25)

```

```

146 plt.xlabel('position(km)', fontsize=25, fontweight='bold')
147 plt.ylabel('density', fontsize=25, fontweight='bold')
148 plt.title('"car"', fontsize=25, fontweight='bold')
149
150 plt.tight_layout()
151 plt.show()

```

東松島市の昼間人口の分布の作成と、それを用いて、海岸からの距離と密度の時系列変化のグラフを出力するコード

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy import stats
4
5 #####
6
7 # 空間領域の設定
8 L = 10 # 空間の長さ(km)
9 nx = 2000 # 空間の分割数
10 dx = L / nx # 空間刻み幅
11
12 # 時間領域の設定
13 T = 1 # 時間(h)
14 nt = 10000 # 時間の離散化数
15 dt = T / nt # 時間刻み幅(h)
16
17 # スピードの設定
18 u = 8 # h/km
19
20 qmax = 120 # 車の最大密度 veh/km
21
22 lam0 = 0.01
23 lam1 = 0
24 l = 100 # どれだけ先を見越すか (km*(L/nx))
25
26 p = 2 # 平均乗車人数
27
28 #####
29
30 # 昼
31 # カスタム分布の定義
32 def walk_custom_pdf(x):
33     if 0 <= x < 1:
34         return 0 # 密度が0の区間
35     elif 1 <= x < 2:
36         return 1 # 密度が1の区間
37     elif 2 <= x <= 4:
38         return 3 # 密度が3の区間

```

```

39     else:
40         return 1 # 密度が1の区間
41
42 def walk_sample_custom_distribution(size):
43     samples = []
44     while len(samples) < size:
45         x = np.random.uniform(1, 10)
46         # 一様分布でランダムにサンプル (1から10の範囲)
47         y = np.random.uniform(0, 10) # PDFと比較するためのランダム値
48         if y < walk_custom_pdf(x): # PDFに基づく受容拒否/
49             samples.append(x)
50     return np.array(samples)
51
52 # カスタム分布の定義
53 def car_custom_pdf(x):
54     if 0 <= x < 1:
55         return 0 # 密度が0の区間
56     elif 1 <= x < 2:
57         return 1 # 密度が1の区間
58     elif 2 <= x <= 4:
59         return 3 # 密度が3の区間
60     else:
61         return 1 # 密度が1の区間
62
63 def car_sample_custom_distribution(size):
64     samples = []
65     while len(samples) < size:
66         x = np.random.uniform(1, 10)
67         # 一様分布でランダムにサンプル (1から10の範囲)
68         y = np.random.uniform(0, 10) # PDFと比較するためのランダム値
69         if y < car_custom_pdf(x): # PDFに基づく受容拒否/
70             samples.append(x)
71     return np.array(samples)
72
73 # サンプル生成
74 samples_walk = walk_sample_custom_distribution(7000)
75 samples_car = car_sample_custom_distribution(7000)
76
77 # 初期条件の設定
78 q_walk = np.zeros(nx)
79 q_car = np.zeros(nx)
80
81 for sample in samples_walk:
82     index = int(sample * nx / L) # 位置に変換
83     if index < nx:
84         q_walk[index] += 100
85     np.save('q_walk.npy', q_walk)
86
87 for sample in samples_car:
88     index = int(sample * nx / L) # 位置に変換
89     if index < nx:
90         q_car[index] += 100
91     np.save('q_car.npy', q_car)

```

```

92
93 #####
94
95 # 昼間乗り捨てなし10 km/hour
96 p1 = 0
97 p2 = 0 # 乗り捨て区間
98
99 vmax = 10 # h/km
100
101 norisute = 0 # 乗り捨てた人数
102
103 dead = 0
104 alive = 0
105
106 plt.figure(figsize=(15, 10)) # サブプロット全体の図のサイズを設定
107
108 q_walk= np.load('q_walk.npy')
109 q_car = np.load('q_car.npy')
110
111 # WALKのグラフ
112 plt.subplot(2, 1, 1)
113
114 # t=0 の棒グラフ
115 positions = np.linspace(0, L, nx)
116 q_walk = q_walk * (375 / np.max(q_walk))
117 # 最大値が330になるようにスケール
118 plt.bar(positions, q_walk, width=L/nx, color='blue', alpha=0.7,
119 label='t=0')
120
121 # CARのグラフ
122 plt.subplot(2, 1, 2)
123
124 # t=0 の棒グラフ
125 q_car = q_car * (187 / np.max(q_car)) # 最大値が120になるようにスケール
126 plt.bar(positions, q_car, width=L/nx, color='blue', alpha=0.7,
127 label='t=0')
128
129
130
131 for n in range(1, nt + 1):
132     qold_car = q_car.copy()
133     qold_walk = q_walk.copy()
134
135     qold_car[0] = 0
136     qold_car[1] = 0 # 左端
137     qold_car[-1] = 0 # 右端
138     qold_car[-2] = 0
139
140     qold_walk[0] = 0
141     qold_walk[1] = 0 # 左端
142     qold_walk[-1] = 0 # 右端
143     qold_walk[-2] = 0
144

```

```

145     for j in range(1, nx - 1):
146         total = 0
147         lam=0
148
149         if qold_car[j] > 120 or qold_car[j-1] > 120:
150             if qold_car[j+1]<120:
151                 v_local =5
152                 v_local_j_minus_1 =5
153             else:
154                 v_local = 0 # 速度をに設定0
155                 v_local_j_minus_1 = 0 # セル j-1 の速度を 0 に
156         else:
157             v_local = vmax * (1 - qold_car[j] / qmax)
158             v_local_j_minus_1 = vmax * (1 - qold_car[j-1] / qmax)
159
160
161         if p1 < j < p2: # 乗り捨て範囲内
162             for i in range(j, min(j + 1, nx)):
163                 total += qold_car[i]
164                 lam = lam0 * total
165                 norisute += dt * dx * qold_car[j] * p * lam
166                 q_walk[j] = qold_walk[j] - dt / dx * (qold_walk[j] * u
167                 - qold_walk[j - 1] * u) + p * lam * qold_car[j] * dt
168                 q_car[j] = qold_car[j] - dt / dx * (qold_car[j]
169                 * v_local - qold_car[j - 1] * v_local_j_minus_1)
170                 - lam * qold_car[j] * dt
171             else: # 乗り捨て範囲外
172                 q_walk[j] = qold_walk[j] - dt / dx * (qold_walk[j] * u
173                 - qold_walk[j - 1] * u)
174                 q_car[j] = qold_car[j] - dt / dx * (qold_car[j]
175                 * v_local - qold_car[j - 1] * v_local_j_minus_1)
176
177
178         if n == 5000 and j < 1200:
179             dead += q_walk[j] * dx + q_car[j] * p * dx
180         else:
181             alive += q_walk[j] * dx + q_car[j] * p * dx
182
183     # 時間発展ループ内
184     if n % 1200 == 0:
185         # の密度グラフ更新Pedestrian
186         plt.subplot(2, 1, 1)
187         plt.plot(np.linspace(0, L, nx), q_walk, marker='o', lw=2,
188                 label=f't={n * 0.006}')
189
190         # CARの密度グラフ更新
191         plt.subplot(2, 1, 2)
192         plt.plot(np.linspace(0, L, nx), q_car, marker='o',
193                 markersize=2, lw=2, label=f't={n * 0.006}')
194         print(f"{n * 分時点で乗り捨てた累計人数は0.006}{norisute人}")
195
196     print(f生存者は"{alive人}")
197     print(f死亡者は"{dead人}")

```

```

198
199 plt.subplot(2, 1, 1)
200 plt.axvspan(p1 * dx, p2 * dx, color='gray', alpha=0.5)
201 plt.axvline(x=6, color='red', linewidth=5)
202 plt.grid(color='black', linestyle='dashed', linewidth=0.5)
203 plt.xlim([0, L])
204 plt.ylim([0, 600])
205 plt.xticks(fontsize=25)
206 plt.yticks(fontsize=25)
207 plt.xlabel('position(km)', fontsize=25, fontweight='bold')
208 plt.ylabel('density', fontsize=25, fontweight='bold')
209 plt.legend(fontsize=20, title='time(minute)', title_fontsize=20)
210 plt.title('"Pedestrian"', fontsize=25, fontweight='bold')
211
212 plt.subplot(2, 1, 2)
213 plt.axvspan(p1 * dx, p2 * dx, color='gray', alpha=0.5)
214 plt.axvline(x=6, color='red', linewidth=5)
215 plt.grid(color='black', linestyle='dashed', linewidth=0.5)
216 plt.xlim([0, L])
217 plt.ylim([0, 200])
218 plt.xticks(fontsize=25)
219 plt.yticks(fontsize=25)
220 plt.xlabel('position(km)', fontsize=25, fontweight='bold')
221 plt.ylabel('density', fontsize=25, fontweight='bold')
222 plt.legend(fontsize=20, title='time(minute)', title_fontsize=20)
223 plt.title('"car"', fontsize=25, fontweight='bold')
224
225 plt.tight_layout()
226 plt.show()

```