

超短時間での津波到達が想定される地域における 超小型モビリティ及びパーソナルモビリティに着目した避難手法の検討 —沼津市戸田地区を対象に—

Examination of evacuation methods focusing on micro-mobility
in areas where tsunamis are expected to reach in a very short period of time

竹島 小一郎¹, 加藤 孝明², 田中義朗³, 鎌田亮⁴

Koichiro TAKESHIMA¹ and Takaaki KATO²

¹有限会社匠（元東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻）

Takumi Co.,Ltd.

²東京大学 生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

³日本工営株式会社 / 一般社団法人富士山チャレンジプラットフォーム

Nippon Koei Co.,Ltd. / Fujisan Challenge Platform

⁴日本工営株式会社

Nippon Koei Co.,Ltd

In this study, we investigated the possibility of using micro-mobility in tsunami evacuation. In the areas where the tsunami is expected to reach in very short time, it is difficult to evacuate safely partly due to the aging of the society. We researched the evacuation behavior in the evacuation drill of Heda area and found that it is difficult to evacuate before encountering a tsunami actually. As a result of comparing several policies in a specific area, we focused on micro-mobility, which has become increasingly popular in recent years. We evaluated several introduction scenarios of the mobility, using traffic simulations. The result shows that it is possible to increase the success rate of evacuation under certain rules.

Keywords: tsunami evacuation, evacuation drill, utilization of beacons, micro-mobility, traffic simulation

1. 研究の背景と目的

南海トラフ地震等では非常に短時間で津波が到達することが想定されている地域が存在する。高齢化の進展もあり従来基本的な避難手段とされていた徒歩のみでは避難が困難となっている。本研究ではこのような津波からの安全な避難が困難な地域に対して、どのようなアプローチが可能かを特定の地域をモデルケースとして歩行者シミュレーションを用いてミクروسケールでの検証を行う。津波避難計画の策定にあたっては地域の実情を勘案していくことが重要であり、全国一律の対策というものは現実的には存在しない。しかし、条件の厳しい地域での検証を行うことによって他の地域における適用の際の知見が得られることが期待できる。

本研究では地域特性の検討の結果、超小型モビリティ等（後述）に着目しマイクロ交通シミュレーションを用いて多様な避難手段が混在する避難シミュレーションを行った。これらのモビリティの、自動車や自転車といった現在普及している交通手段とは異なる避難時の特性を明

らかにすることで、特に現状では対策の難しい高齢化の進行している地域等における新たな避難手段の候補及びそれによる改善の可能性を提示することが本研究の目指すところである。高齢化やMaaS（Mobility as a Service）の普及といった状況を背景に新たなモビリティに関する議論や実際の地域への試験的導入が近年活発化している。その一方で防災面の効果に関する定量的な評価を行った研究は現時点では行われておらず、本研究により現況で解決困難な防災的な課題を抱える地域に新たな対策の候補を提示できる可能性がある。加えて今後の地域交通の議論において新たな評価指標を提示し多角的な検討が可能となることが将来的には期待される。ミクروسケールで各歩行者や自転車の相互作用を考慮した避難シミュレーションについては先行研究¹⁾²⁾³⁾が存在するが、歩行者と超小型モビリティ等の混在が避難行動に及ぼす影響についての研究はなされておらず、これを明らかにすることで実際の避難計画の策定に寄与することができる。

2. 検討対象地域の現状

本研究における対象地区は静岡県沼津市戸田地区である。対象地区の選定理由としては、高齢化の進展が著しいこと、南海トラフ地震等における津波到達時間が他地域と比較しても著しく短いこと、地区内に津波避難タワー、高台、浸水域外の平地といった異なる津波避難場所が存在しており避難手段の検証に適することが挙げられる。

平成 27 年度国勢調査⁴⁾によれば戸田地区の高齢化率は 47.5%、後期高齢者が人口に占める割合も 23.8%と高齢化が進展している。また、静岡県第 4 次想定⁵⁾によれば地震発生後最短で 4 分で津波が到達し 5~10 分程度で地区内の沿岸部集落が浸水するとなっている。沼津市津波避難計画⁶⁾においては、避難開始時刻を地震発生後 5 分、移動速度を 1m/秒として避難困難区域を指定しており、戸田地区は他の地区と並んで津波避難困難区域となっている。2018 年度に沼津市が地元意向及び技術的基準に基づき作成した「逃げ地区」⁷⁾においても、避難開始時刻は地震発生後 3 分、移動速度は 1.5 m/秒と他地域より厳しい前提条件がおかれ、当地区は他の地区と比較して高い水準での避難行動が要求される地区といえる。

2019年12月1日に実施された避難訓練において東京大学加藤孝明研究室、日本工営株式会社、一般社団法人富士山チャレンジプラットフォームの合同で避難行動のログデータ取得(2地区)及びアンケートの配布(6地区)を行い避難行動の実態について調査を行った。避難訓練は午前9時に地震発生、同3分に大津波警報発令の設定で行われた。参加者の年齢構成は60代以上が多数を占めた(表 1)。

表1 避難訓練参加者の年齢構成(地区全体)

19歳以下	20代	30代	40代	50代	60代	70代	80代以上
4	0	10	12	32	93	159	97

ログデータ取得は富士山チャレンジプラットフォーム開発のシステムを用いた。避難訓練参加者に事前に配布したビーコンが避難経路上に設置したレーザーに接近すると、検知情報が携帯キャリア回線を経由してクラウドシステムに送信されビーコンのID番号や通過時刻が記録される。調査の結果、平均移動速度は小中島地区0.69 m/秒(57名)、奥南地区0.47 m/秒(37名)であり午前9時の避難訓練開始から5分以内に避難を完了したのは5割程度であった(表2)。

表2 ビーコンによる計測データ

	避難者数	平均移動速度(m/秒)	平均避難距離(m)	平均避難時間	5分以内避難完了割合(%)
小中島	57	0.69	148.2	4分45秒	41.7
奥南	37	0.47	107.5	4分22秒	56.7

アンケートでは 1)家族構成, 2)年齢, 3)障害物の保有, 4)避難開始までの時間, 5)避難行動要支援者の有無, 6)避難時所持品の用意, 7)避難時所持品, 8)避難所の選定, 9)避難場所選定理由, 10)訓練疲労度, 11)避難声掛け, 12)避難同行者の 12 項目を設定した(回収数 404)。結果は避難時の声掛けや避難同行者といった共助の部分は高

い傾向となったものの、避難開始時刻(訓練開始から実際に避難を開始するまでの時間)については 3 分以内に避難を開始したのは 66.8%にとどまることが判明した(表 3)。

表3 津波避難開始までに要した時間

	1分未満	1~2分	2~3分	3~4分	4分以上	合計
小中島	8	14	18	7	4	51
大中島	6	32	40	16	14	108
一色	2	7	15	17	7	48
入浜	3	17	39	14	26	99
口南	1	4	9	5	2	21
奥南	3	10	11	5	2	31
合計	23	84	132	64	55	358

なお避難行動要支援者の有無についても家族または近所に避難行動要支援者が存在する住民の割合が各地区で 38.5~76.9%となっていることが明らかとなった(表 4)。

表4 災害時避難行動要支援者の有無(地区全体)⁽¹⁾

家族	近所	両方	なし	要支援者保有率(%)
79	80	6	206	44.5

以上のように津波避難計画の基準よりも実際の避難行動は低い水準となっていること及び避難行動要支援者が相当数存在することから津波避難に関して新たな対策の必要性が現時点での避難行動の実態からも示された。

3. 津波による人的被害軽減の対策案の比較検討

防波堤の整備といったハード事業以外について津波避難対策を一般に整理したものが表 5 である。方針としては浸水想定域外への移転、避難距離の短縮、避難速度の向上に大別される。以下各施策について対象地区の実態を踏まえながら適用の可能性を検討する。

まず集団移転については、津波による被災が想定される地域から集団で移転することにより津波リスクの解消ができ、地域コミュニティも比較的維持しやすいことが利点である。一方で移転先の土地の造成や新規住宅の整備等で事業費が必要であり住民の負担もある。また、地域での合意形成が必要となるため事業が確実に実施できるかは不確実である。代表的な事業スキームとしては防災集団移転事業があり、沼津市重須地区において事業実施に向けた動きがあったが経済的負担といった理由から地域の合意に至らず断念した事例⁸⁾もある⁽²⁾。また、高齢者が多い地域では安全性のみでは動機づけとしては弱く移転費用の確保が困難である可能性が指摘されている⁹⁾ことから実現するとしても長期間にわたることが予想され、別途短中期での対策が必要とされるであろう。

次に個別での移転については対象地区では津波浸水域外に比較的新しい住宅が立地していることが多いことから今後、建て替えや代替りの機会に次第に地区の重心が浸水域外へと移動していくことが予想される。しかし、集団での移転と同じように移転の可能性は各個人ないし世帯の経済状況を含む個別の事情に大きく依存しており、仮に財政支援を行ったとしても高齢者の移転へのインセンティブの問題は同様に存在するであろう。長期的なリスク低減という観点では検討すべきであるが、短中期的

表 5 津波避難対策の一覧

方針	施策	長所	短所・懸念事項
(1) 浸水想定域外への移転	(a) 集団移転(防集事業等)	・地域の津波リスク解消 ・既存コミュニティの継続	・事業費 ・事業期間の長期化 ・住民合意の形成
	(b) 個人での移転・移住	・個人の津波リスク解消 ・実現までの期間	・個人の資力による格差 ・無秩序な開発のおそれ ・高齢世帯への効果
(2) 避難距離の短縮	(a) 新たな避難設備の整備(避難タワー, 自然地形の利用)	・避難時間短縮 ・簡易な避難所としての機能	・用地確保 ・事業費 ・維持管理 ・階段利用困難な避難者の存在
	(b) 既存施設の利用(避難ビル指定, 補助金)	・比較的低コスト	・候補施設の有無 ・運用についての合意 ・階段利用困難な避難者の存在
(3) 避難速度の向上	(a) 共助による助け合い	・大規模な設備投資が不要	・介助者のリスク ・地域での合意形成 ・高齢化による担い手減少
	(b) 徒歩以外の交通手段の導入(自動車やその他モビリティ)	・個人々人での避難が可能 ・平時・被災後の活用可能性	・導入費用, 維持費 ・道路閉塞や路面状態, 道路幅員の影響

な対策について議論が必要なことは集団移転と同様である。

新たな避難場所の整備としては津波避難タワー若しくは自然地形の利用が考えられるが、対象地区においては高台までは距離があるため津波避難タワーが検討の対象となろう。現在対象地区には一基存在する。津波避難タワーの利点としては、避難距離の短縮が見込めることや事業費・工期が堤防のかさ上げ等と比較して有利であること、整備状況によっては簡易な避難所としての機能を付与することが可能であることなどが挙げられる。一方で対象地区において整備する場合は用地の確保が課題となる。特に戸田地区の場合、漁村集落であるため建物の密集度は高く用地確保は困難である。この点については先例のある道路空間の利用や上述の浸水域外への移転、空き家の敷地を公的な目的に使用できる事業スキームが存在すれば更なる対策の可能性はあると思われる。

既存施設の活用については現行の基準では構造によらず津波に対する安全性を満たすことや、避難場所の高さについては建築物への衝突による水位の上昇を考慮することなどが定められている¹⁰⁾。これらの基準を満たすためには3階建て以上が必要となることから対象地区においては構造の安全も満たしたうえで新たに候補となる建築物を探すことは難しいと思われる。一方で新規に建築される建築物に津波避難ビルの機能を持たせることも考えられ、浜松市において市街化調整区域における開発許可において津波避難ビルが都市計画法第34条第14号に追加された事例がある¹¹⁾。しかし戸田地区は都市計画区域外であり開発許可制度が適用されない上、激しい人口減少の下では浸水想定地域内に津波避難ビルとして機能する建築物が新規に建築される可能性は高いとはいえないであろう。

共助による助け合いに関しては、避難の猶予時間がごく短い状況においては高齢者や特に避難が困難な避難行動要支援者については近隣住民等の声かけや避難支援が必要であるとともに、支援者及びその家族等についても安全が確保されなければならない¹²⁾。支援行動を避難に

組み込んだ研究としては避難シミュレーションにより支援者数をただ増やすだけではなく支援者・要支援者の被害軽減のためには念密な計画が必要であるということ示したものや¹³⁾、避難時間の短い津波災害では送迎によらない自主的な避難の重要性を指摘しているもの¹⁴⁾がある。一方で地域全体で高齢化が進展し支援者の担い手が減少することが見込まれるなかでどのように支援の手段を確保していくかが重要である。基本的に津波避難においては他者への支援は支援者自身のリスクを高める行為であり支援者への心理的負担ともなりうる。地域における前向きな議論を阻害する可能性も懸念され事前に計画として組み込むことには十分な注意が必要である。

徒歩以外の交通手段の導入については大きく人力によるものと動力によるものに分けられる。人力によるものとしては自転車やリヤカー等、動力を用いるものとしては自動車の他、超小型モビリティやパーソナルモビリティといわれるような実証実験や普及が始まったばかりの比較的新しいモビリティ(図6)が考えられる。



図 6 新たに津波避難で活用可能性のあるモビリティ
 左上：トヨタ車体 コムス¹⁵⁾
 左下：スズキ セニアカー¹⁶⁾
 右下：WHILL ModelA¹⁷⁾

自動車については自動車を用いた避難計画策定の例¹⁸⁾があるが、狭小幅員の道路が多い対象地区においては超小型モビリティやパーソナルモビリティの有効性が高く思われる。一方でこれらについて津波避難に適用した研究はみられない。

以上の点をまとめると、長期的には移転といった土地利用形態の変更を視野に入れつつも、高齢化や新しい避難場所の整備が難しいことを考慮すれば超小型モビリティやパーソナルモビリティの活用の可能性を検討すべきであるといえる。

4. 超小型モビリティ及びパーソナルモビリティの概要

本研究においては以下のように用語を定義する。

「超小型モビリティ」

…「自動車よりコンパクトで小回りが利き、環境性能に優れ、地域の手軽な移動の足となる1人～2人乗り程度の車両」（国土交通省の定義¹⁹⁾に準ずる）

「パーソナルモビリティ」

…主に個人の歩行を補助・代替する移動機器

「超小型モビリティ等」

…上記の「超小型モビリティ」と「パーソナルモビリティ」を合わせたもの

各モビリティについて法的な位置づけを整理したものが表7である。「超小型モビリティ」については大きく2つに分類される。一つは道路交通法上の普通自動車であり、道路運送車両の保安基準第55条第1項に基づく認定制度の適用による基準緩和を受けることで公道走行が可能となるもので、もう一つは道路交通法上の原動機付自転車である。前者は後者と比較して定員・荷物積載・最高速度といった点上回っている。「パーソナルモビ

リティ」についても大きく電動車いす（シニアカーとも呼ばれる、セニアカーはスズキ株式会社の商標）と搭乗型移動支援ロボットの2種類に分けられる。電動車いすは道路交通法上歩行者として扱われる。搭乗型移動支援ロボットは小型特殊自動車若しくは原動機付自転車として扱われ、公道走行には実証実験として一定の手続きを得ることが必要である。

超小型モビリティの導入による便益としては環境負荷の低減や交通・道路等への好影響、広告・宣伝効果、利用者利便性の向上が一般に考えられ²⁰⁾、大都市郊外²¹⁾や中山間部²²⁾での活用事例についての研究が存在する。

電動車いすについては免許返納後も一人で利用できる交通手段であり、要介護者のみならず足腰の不自由な高齢者の交通手段として活用され、行動範囲を広げることで高齢者の社会活動促進や健康増進の可能性が期待されているとともに、シェアリングサービス等との連携によりMaaSの一環としての普及の可能性もある²³⁾。電動車いすの利用とQOLの関係を調査した研究²⁴⁾においてもコミュニケーション機会の増加がQOLの増加にむすびついている可能性が指摘されている。一方で外出先における走行環境の悪さによって外出が阻害された事例が同時に報告されているほか、超小型モビリティについても普及した状況下では普通自動車との走行空間の分離が必要であることが指摘されており²⁵⁾、道路インフラの整備が課題として考えられる。他の導入の課題としては安全性や価格の低減、環境整備、事業運営等が存在している。

5. 避難シミュレーションによる評価

以上の考察を踏まえマイクロ交通シミュレーションによる評価を行った。シミュレーションにはPTV社のVISSMを用いた。VISSIMにおける歩行者モデルはSocial Force

表7 各モビリティの法的位置づけ及び規格

形態	超小型モビリティ		パーソナルモビリティ	
			電動車いす	搭乗型移動支援ロボット
代表的車種	コムス（2人乗り） （トヨタ車体）	コムス（1人乗り） （トヨタ車体）	セニアカー （スズキ）	セグウェイ （Segway Inc.）
法的位置づけ	・普通自動車 （道路交通法） ・道路運送車両の保安基準第55条第1項に基づく認定制度の適用により基準緩和を受けることで公道走行が可能	原動機付自転車 （道路交通法）	・身体障害者用の車椅子 （道路交通法第2条 11の3） ・歩行者扱い （同法第2条 31） ・特別の手続きなく公道走行可能	・小型特殊自動車 （歩道等移動専用自動車）若しくは原動機付自転車 ・公道公証実験として以下の手続きを経たうえで公道走行可能 ・地方運輸局の基準緩和認定 ・警察署の道路使用許可 ・市区町村への届出及びナンバー交付
サイズ上限（mm）	軽自動車規格 （3400×1480×2000、道路運送車両法施行規則）	2500×1300×2000 （道路運送車両の保安基準）	1200×700×1200 （施行規則第1条の4）	1500×700×2000（原付）、2800（小特）
定員	1～2人	1人	1人	1人
荷物の積載	30 kgを超えて可能	30 kg以下まで	-	-
法定速度	認定による	60 km/h	6 km/h （施行規則第1条の4）	10 km/h

Model²⁶⁾を基にしている。シミュレーション対象範囲は上述の避難訓練においてアンケートを実施した6地区とした。道路ネットワークは航空写真から判読し作成した(図8)。歩行者及び各モビリティはこのネットワーク全体を使用できるとした。

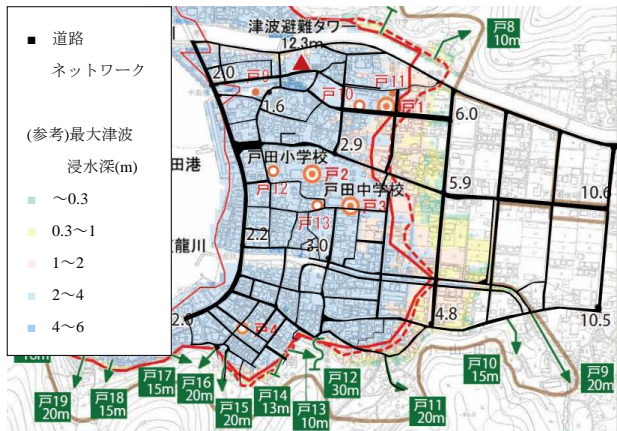


図8 道路ネットワーク設定状況
(背景図：沼津市津波ハザードマップ)

避難場所は津波避難計画及び「逃げ地図」に準拠した①から⑳の21か所(津波避難ビル候補3か所を含む)を設定した(図9)。



図9 避難場所位置図

各避難場所の情報は表10のとおりである。最大規模の津波を想定して各避難場所の避難完了位置を設定した。避難者の避難場所の割り当ては「逃げ地図」に基づいて設定し、経路については最短距離をとるものとした。

避難者数は2020年4月30日時点の各地区の夜間人口データをベースに設定した。避難者については「健常者」「一般高齢者」「避難行動要支援者」の3属性に区分した。「健常者」は避難に関して能力的に問題がない避難者、「一般高齢者」は避難行動をとることに支障はないが「健常者」よりも移動速度は低い避難者、「避難行動要支援者」は単独で避難行動をとることが困難な避難者とし、各属性の避難者の割合は平成27年度国勢調査の戸田地区の年齢別人口及びアンケート結果から設定した。「避難行動要支援者」については重複の可能性を考慮し、「家族」の数値を用いた。本シミュレーションでは地区ごとの属性比率に基づいて乱数を用い各避難者に属性を

表10 各避難場所の設定

避難場所	種類	避難完了地点高さ(m)	階段有無	備考
①	津波避難タワー	7	有	
②	津波避難ビル	6	有	保健センター
③	津波避難ビル	6	有	小学校
④	津波避難ビル	6	有	中学校
⑤	津波避難ビル	6	有	民宿
⑥	浸水域外の平地	-	無	
⑦	浸水域外の平地	-	無	
⑧	浸水域外の平地	-	無	
⑨	浸水域外の平地	-	無	
⑩	浸水域外の平地	-	無	
⑪	浸水域外の平地	-	無	
⑫	浸水域外の平地	-	無	
⑬	浸水域外の平地	-	無	
⑭	高台	10	有	
⑮	高台	10	有	
⑯	高台	6	有	
⑰	浸水域外の平地	-	無	
⑱	高台	10	有	
⑲	津波避難ビル	6	有	津波避難ビル候補
⑳	津波避難ビル	6	有	津波避難ビル候補
㉑	津波避難ビル	6	有	津波避難ビル候補

割り当てている。参考に地区全体での属性ごとの避難者数を表11に示す。

表11 各属性ごとの避難者数

健常者	一般高齢者	避難行動要支援者	合計
653	511	79	1243

避難者の人数の配分は、まず航空写真から住宅地を判読し各街区の面積を計算し、次に各地区の人口を街区面積で按分しその街区の避難者数とした。

検討の対象とするモビリティは法的手続きや普及状況も考慮し「超小型モビリティ」と「パーソナルモビリティ(シニアカー)」の2種とした。乗降に要する時間についてはデータが存在しなかったためそれぞれ60秒、10秒と仮定し、実値は両者の間にあるとみなすこととした。これらのモビリティを使用するすべての避難者は避難開始時に発生地点で発生後その地点で所定時間待機し、階段のある避難場所については避難場所である建築物近傍に設定した降車地点でも同様に待機し以降は歩行による避難を行うものと設定した。また、後方からの追越し時の側方距離については、自転車と歩行者に関して追い越し際の側方間隔が77cmという実験結果²⁷⁾やすれ違い時に危険感知確率を十分低くできると考えられる側方の限界距離が1m強である実験結果²⁸⁾、立ち乗り型パーソナルモビリティと歩行者のすれ違い時の側方間隔が約50cm²⁹⁾、車椅子と歩行者混在下での避難実験において両側合わせて1m前後の距離がとられる³⁰⁾といった実験結果を参考にそれぞれ1m、50cmとなるように設定した。

移動速度及び避難開始時刻については(A)(B)2種類の想

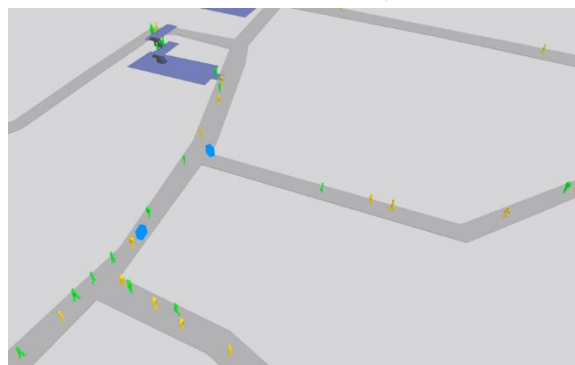
定を設けた。避難開始時刻は(A)全員が地震発生3分後に直ちに避難、(B)アンケート結果に基づいた設定の2種類である。(B)は震発生後3分に表3の時間を足したものをシミュレーションにおける避難開始時刻として、アンケート結果に基づいた確率で各発生地点ごとに1分単位の避難者数を決定し、1分内での発生タイミングはポアソン分布に従うとした。移動速度については「健常者」については(A)(B)共通で沼津市津波避難計画の設定である1.5 m/秒とした。「一般高齢者」については(A)は一般的な設定である1m/秒、(B)については2019年12月の調査結果を参考に0.65 m/秒とした。「避難行動要支援者」については単独での避難行動が難しいことを鑑み「一般高齢者」の1/3程度と想定し、(A)0.33 m/秒、(B)0.2 m/秒と設定した。階段部分についてはそれぞれの50%の速度とした。超小型モビリティは歩行者との混在下であることや道路幅員が狭いことを考慮し10 km/hとした。シニアカーについては法定の上限である6 km/hとした。(A)(B)の設定理由は(A)は超小型モビリティ等の導入による効果を明確にするためのものであり、(B)は導入後もなお残る課題について明らかにするために(A)より実態に即した厳しい仮定を置いたものである。

導入シナリオとしては以下の9ケースを設定し、移動速度及び避難開始時刻の想定と組み合わせて計16ケースを設定した(表12)。ケース1については現況の避難場所(①~⑮)で避難行動は津波避難計画に準ずるものとした。ケース2は指定予定の津波避難ビル(⑰~⑳)をケース1に追加し津波避難計画に沿うものである。なお、ケース1では他ケースで避難場所⑰~⑳を避難先とする避難者はそれぞれ避難場所①、④、③に割り当てている。ケース1ではケース3は避難訓練での調査結果を反映したもので最も実施ケースの中で現状の実態に近いと思われる。ケース4~6は超小型モビリティを用いるケースでケース4は「避難行動要支援者」のみが超小型モビリティを使用することでモビリティ利用を最低限に抑えたケースである。ケース5は「一般高齢者」+「避難行動要支援者」

が超小型モビリティを使用するモビリティ利用を最大限に想定したケースとなる。ケース6はその中間として設定し、避難場所から水平距離で60m以内の避難者は全て徒歩で移動し、それ以外の「一般高齢者」+「避難行動要支援者」は超小型モビリティを利用するケースである。なお、水平距離60mは「避難行動要支援者」の移動速度が0.2m/sでも5分以内に到達可能である範囲とした。ケース7~9についてはケース4~6において使用するモビリティをシニアカーに置き換えたものである。

シミュレーションの実行は各ケース、乱数を変更し10回実行し(図13)、その平均値を評価に用いた。乱数により変化するのは各発生地点における避難者属性及び(B)想定での避難者発生時刻である。

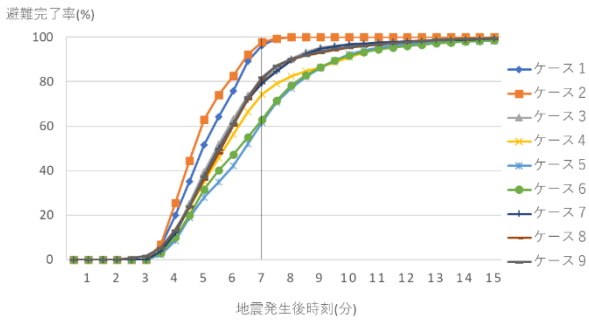
図13 シミュレーション実行画面



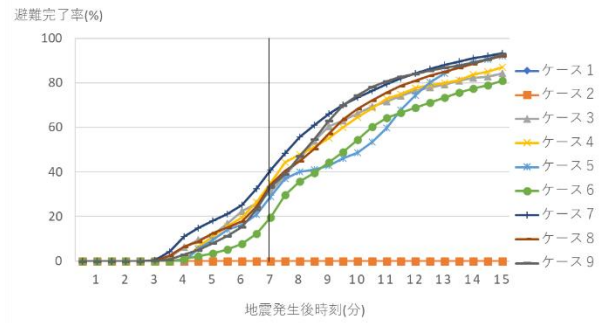
ケース1~9の設定Aについて結果を比較したものが図14である。まず全体では他の対策ケースが現状(ケース3)と同程度にある一方で、ケース4~6については避難完了率が悪化しており、特にケース4及び5では多くの避難場所に津波が到達する7分後の時点で約20%低くなっている。3ケースは他と比較して道路ネットワークへの負荷が大きいためと思われる。避難行動要支援者につ

表12 シミュレーション実施ケース一覧

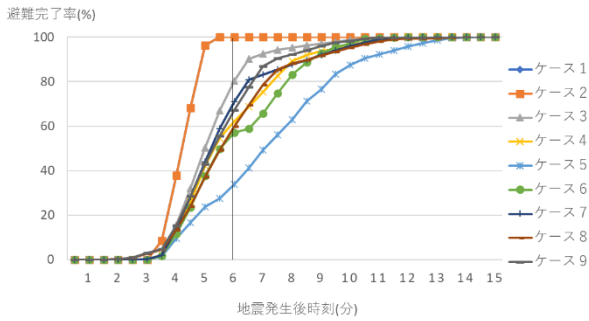
番号	歩行速度 (平地)	避難開始 時刻	避難場所	対策	備考
1	一律 1.5m/s	A	現況のみ	なし	避難計画条件・ 避難場所は現況のみ
2	一律 1.5m/s	A	避難ビル追加	なし	避難計画通り
3-A	A	A	避難ビル追加	なし	避難計画に実態を反映
3-B	B	B			
4-A	A	A	避難ビル追加	避難行動要支援者が超小型モビリティ 利用	対策案最低限ケース
4-B	B	B			
5-A	A	A	避難ビル追加	一般高齢者+避難行動要支援者全てが 超小型モビリティ利用	対策案最大ケース
5-B	B	B			
6-A	A	A	避難ビル追加	避難場所から60m以上の一般高齢者 +避難行動要支援者が超小型モビリティ 利用	対策案中間ケース
6-B	B	B			
7-A	A	A	避難ビル追加	避難行動要支援者がシニアカー利用	対策案最低限ケース
7-B	B	B			
8-A	A	A	避難ビル追加	一般高齢者+避難行動要支援者全てが シニアカー利用	対策案最大ケース
8-B	B	B			
9-A	A	A	避難ビル追加	避難場所から60m以上の一般高齢者 +避難行動要支援者がシニアカー利用	対策案中間ケース
9-B	B	B			



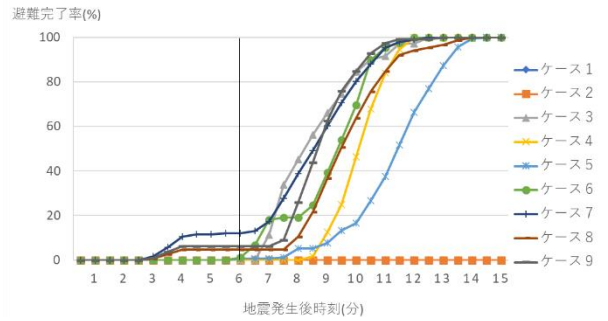
対象地区全体 (全避難者属性)



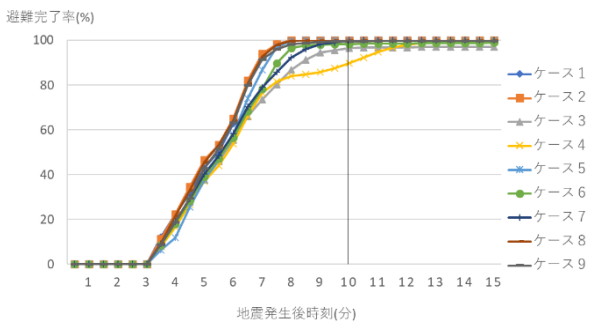
対象地区全体 (避難行動要支援者)



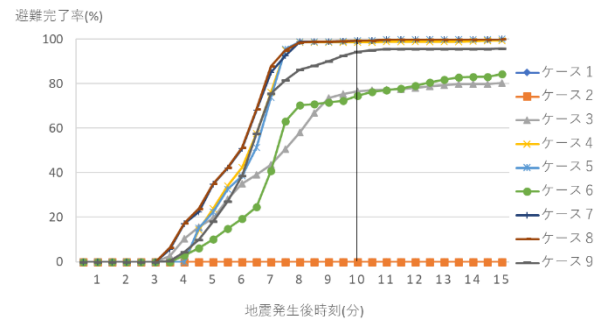
中心部避難ビル (全避難者属性)



中心部避難ビル (避難行動要支援者)



浸水域外平地 (全避難者属性)



浸水域外平地 (避難行動要支援者)

図 14 避難完了率の時系列変化(移動速度, 避難開始時刻設定 : A)

いても同様の傾向がみられ、モビリティの利用を最小限に抑えたケース 7 が最も効果がみられる一方でケース 4 及び 5 は効果が低い結果となった。次にモビリティ利用に適する避難場所の条件について検討するため、条件が対照的な中心部の津波避難ビル(番号⑤)と浸水域外の平地(番号⑥~⑬, ⑰)について集計を行った。中心部の津波避難ビルは周囲の道路幅が狭く、複数方向から避難者が集まり、水平方向の避難距離は比較的短い段階により垂直方向に移動する必要がある。一方で浸水域外の平地は道路幅員が比較的広く、避難者は一方向に避難し水平方向の移動距離が長い一方で階段等を利用して垂直方向に移動する必要がない。中心部の避難ビルについてはほとんどのケースで避難者全体では悪化しており、特にケース 5 は津波が到達する 6 分後時点で 40%以上避難完了率が低下している。避難行動要支援者のみでも 6~7 分頃までは複数のケースでやや改善傾向にあるものの、全体としては悪化傾向である。これは避難場所周辺の道路幅員が狭く複数方向から交差点へ超小型モビリティ等が流入するため混雑が発生しやすいこと(図 15)と、水平方向の移動距離が短く移動速度向上による効果より

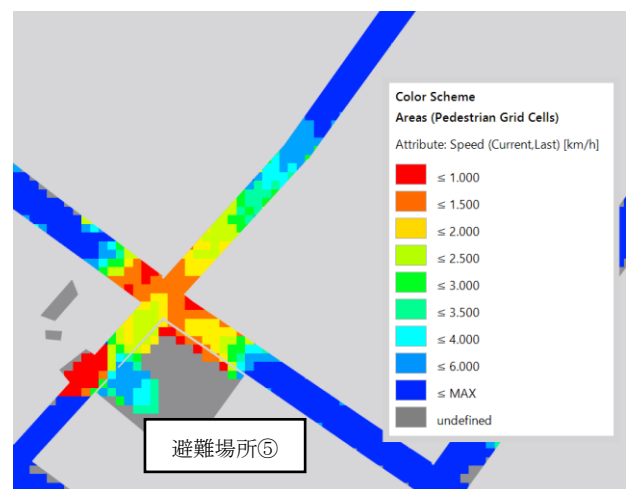
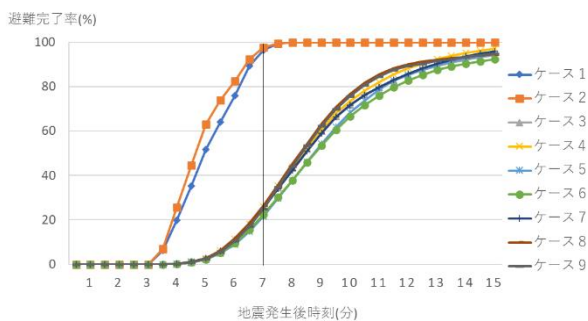


図 15 避難場所付近の混雑による速度低下 (ケース 5-A, 4 分台の平均速度)

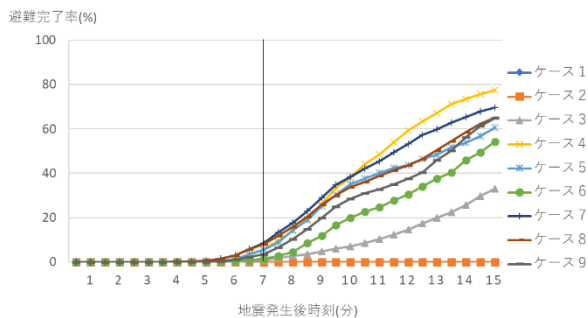
も乗降に要する時間の増加と垂直方向の移動の占める割

合が大きいことによるものと思われる。浸水域外の平地について全属性合計ではほとんどの対策ケースにおいて改善がみられる。避難行動要支援者ではモビリティ利用量の大きいケース 5, 8 と最小限に抑制したケース 4, 7 の改善傾向が同程度であることが特徴である。避難場所の手前まで津波が到達するまでには 10 分程度あるが、4 ケースとも 8 分前後でほぼ避難が完了している。大きく改善された要因としてはモビリティからの降車の必要がないことと階段利用がないことと考えられる。また、ケース 6 及び 9 以外は同程度の改善幅となっている一方、両ケースについては 10 分前後で頭打ちとなっている。これは降車や階段の移動がないため移動距離の長いモビリティ利用避難者が先に避難完了しやすいためと思われる。

次に設定 B における対象地区全体の結果を図 16 に示す。



全避難者属性



避難行動要支援者

図 16 避難完了率の時系列変化
(移動速度、避難開始時刻設定：B)

全避難者での 7 分時点での避難完了率はケースによらず 20%程度となっている。一方で避難行動要支援者に着目すると、A 設定の中でケース 3-A と最も改善がみられる 7-A 及び 9-A を比較すると地震発生からの時刻によらず 10%程度の改善となっている一方で、B 設定において 3-B と最も変化の少ない 5-B でも地震発生から 15 分時点では約 20%改善されており、改善の幅は設定 A よりも大きくなっている。これは各避難者の避難開始時刻が分散することで道路ネットワークへの負荷が低減しモビリティ利用による効果が発揮されやすくなったためであると考えられる。ケース A-3 と B-3 を比較すると迅速な避難開始を行ったケース A-3 の方が 7 分時点での全避難者は約 50%、避難行動要支援者は約 30%高くなっている。また、ケース B-3 と他の B 設定の対策ケースと同様に比較すると全避難者ではほぼ変化なしで、避難行動要支援者は最大で約 10%改善されている。これはごく短時間での避難が要求される場合においては移動速度の向上以上に

避難開始までの時間を短縮することの重要性を示唆している。避難における移動速度の向上のみでは限界があり、避難者全体として避難開始の迅速化も合わせて行っていく必要があるといえるだろう。

以上の点を踏まえると超小型モビリティ等を津波避難に導入する際には、ある程度の避難距離がある場合もしくは自力での歩行が困難な場合に限定することが望ましい。避難先としては到着後に降車及び垂直方向の移動をする必要のない浸水域外の平地が適している。今回のシミュレーションでは各避難者の避難先を移動手段によらず一定としたが、モビリティ利用者については平面距離的に最寄りの高台よりも多少離れていても浸水域外の平地へ避難する方が効果的である可能性がある。また、こういった平面的な移動を活用することでとくに階段等の利用がボトルネックとなりやすい避難行動要支援者等について避難完了率の改善が期待され、階段による移動は身体的負担だけではなく心理的負担にもなる可能性があり、その軽減に資する可能性もある。加えて、浸水域外まで避難することで被災後もモビリティを利用することが可能となることも考えられる。道路の通行の観点からは、歩行者やモビリティ同士での干渉による影響を避けるため、モビリティについては避難時には一方通行にする、比較的幅員の広い道路では歩行者と走行空間を分離するといった検討が必要である。

6. まとめ

本研究では超短時間で津波が到達することが想定される地域において地域の実情を踏まえながら津波避難対策を比較検討し、超小型モビリティ等の導入について交通シミュレーションにより検証を行った。シミュレーションの結果、モビリティの交通量が過度に増大すると混雑の悪化により避難が妨げられること、一定の利用ルールの導入により地区全体の避難成功率の向上が期待されること、モビリティの導入にあたっては避難場所の特徴によって効果に差があり移動手段に応じた避難場所の計画の必要性が示された。

今後の課題としては第一に避難シミュレーションの精度向上が挙げられる。実際のモビリティの乗降時間や移動速度の他、歩行者とモビリティが混在した際の挙動についても精査する必要がある。避難場所にモビリティが到着した際の駐車スペースについても考慮しておらず場所によっては駐車容量が不足することも考えられる。また、路上に駐車した場合、降車後の車両により道路の有効幅員が減少する可能性がありその点についても考慮が必要である。地震後の路面状態（落下物の散乱等）にも影響を受ける可能性がある。これらの事項については対象地区において実証実験を行い交通挙動について分析するとともに、道路インフラ等も含めて課題の抽出を行うことが望ましい。

また、今回のシミュレーションは夜間人口を基に作成しているが、対象地区は観光客が訪れており住民以外の津波避難者についても対策の検討が必要であろう。

加えて、今回はモビリティの活用のみに着目した避難シミュレーションを行ったが、実際の津波対策としては短期～長期の時間軸にそって対策を検討する必要がある。移転や避難場所の整備、近隣住民による支援といった対策についてモビリティの活用との組み合わせによる効果

について都市計画制度の運用や地域の交通計画の観点も含めて検討していくべきである。小学校等や避難タワーについてはパーソナルモビリティからの降車なしに安全な高さまで移動できるように改修するといった避難手段に合わせた避難場所の整備についてもその可能性を検討することが望ましい。また、シミュレーション結果から一定の利用抑制が必要なことや経済的負担を考慮すると地域内でのシェアリングといった形態が望ましいと思われるが、事業主体や事業費の他、運用ルールや費用負担についての地域の合意形成といった課題も存在している。日常から超小型モビリティ等を活用することで平常時のQOLの向上に加えて、利用者の運転の習熟による避難時の速度の向上や、地域内の認識度の向上による安全性の向上が期待できると思われ、これらのモビリティを単なる津波からの避難手段ではなく日常から慣れ親しんだ存在になるように努めていく必要がある。

補注

- (1) アンケートに記入に際して避難行動要支援者の個人を特定していないため、同一の避難行動要支援者が各アンケート回答者間で重複して計上されている可能性がある。
- (2) 沼津市重須地区では東日本大震災以降、地元自治会が防災集団移転事業の適用を念頭に住民 440 人の高台移転を目指し、2012 年時点では約 90 戸の 8 割が賛成していた。しかし、2013 年に経済的事情などもあり断念し個別の移転を模索していた。2018 年に県の農地区画整理事業において非農地を創出し、県土地公社への引き渡しを経て移転希望者に売却する方針が決定されたが、対象は 7 世帯にとどまった。

謝辞

本研究にあたり、地域での調整等ご協力頂いた各自治会長をはじめとする戸田地区の皆様及び 2019 年度内閣府地区防災計画モデル事業 WG 運営の株式会社オリエンタルコンサルタツのご担当の皆様に対しここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 亀田知沙, 高橋智幸: 津波避難時における歩車の相互作用を考慮した数値シミュレーションの開発, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, I_349-I_354, 2017.
- 2) 鈴木勉, 長谷川大輔, 若林建吾: 交通制御による災害避難の効率化シミュレーション, オペレーションズリサーチ, 2018 年 7 月号, p.379-385, 2018.
- 3) 竹居広樹, 奥村誠: 歩車混合避難における津波避難リスクと交通事故リスク, 交通工学論文集, 第 4 巻, 第 1 号 (特集号 A), p.A129-A_137, 2018.
- 4) 総務省統計局: 平成 27 年度国勢調査, <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200521&tstat=0001080615&cycle=0&tclass1=000001089055&tclass2=000001089057&tclass3=000001089081>
- 5) 静岡県: 静岡県第 4 次地震被害想定調査第一次報告, 2013 年 6 月 27 日, 2013.

- 6) 沼津市: 平成 30 年度沼津市津波避難対策計画 (平成 31 年 3 月), 2019.
- 7) 沼津市: 逃げ地図・戸田地区, 2019 年 3 月, <https://www.city.numazu.shizuoka.jp/kurashi/anshin/bousai/tsunamitaisaku/doc/11.pdf>
- 8) 静岡新聞: 津波防災目指し、高台に 7 世帯移住へ 沼津・内浦重須地区, 2018 年 3 月 7 日, 2020 年 1 月 25 日閲覧, <https://www.at-s.com/news/article/social/shizuoka/bosai/465079.html>
- 9) 森田紘圭, 大西暁生: 津波災害廃棄物軽減を目指した住宅移転に対する住民意向の分析-南海トラフ沖地震における津波浸水区域を対象として-, 環境科学会誌 30(6), p. 357-364, 2017.
- 10) 内閣府: 津波避難ビル等を活用した津波防災対策の推進について (技術的助言) 平成 29 年 7 月 5 日付け, <http://www.bousai.go.jp/jishin/tsunami/hinan/pdf/shushi.pdf>
- 11) 浅野純一郎, 上田正道: 津波危険区域の市街化調整区域における開発許可制度運用と課題に関する研究: 浜松市を対象として, 日本都市計画学会都市計画論文集, 51(3), 944-951, 2016.
- 12) 内閣府, 災害時要援護者の避難支援に関する検討会報告書 (平成 25 年 3 月), 2013, http://www.bousai.go.jp/taisaku/hisaisyagyousei/youengosya/h24_kentoukai/houkokusyo.pdf
- 13) 北川哲也, 川口淳: 災害時避難行動要支援者を考慮した津波避難シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), p.43-44, 2016.
- 14) 浦田淳司, 羽藤英二: 津波リスク最小化のための送迎避難交通の最適動的制御とその求解方法, 交通工学論文集, 2017 年 3 巻 3 号, p. 1-10, 2017.
- 15) トヨタ車体株式会社: コムスカタログ, 2020 年 7 月 17 日閲覧, http://coms.toyotabody.jp/download/pdf/coms_catalog.pdf
- 16) スズキ株式会社: ET4D 主要諸元, 2020 年 7 月 17 日閲覧, <https://www.suzuki.co.jp/welfare/et4d/detail/spec.html>
- 17) WHILL 株式会社: WHILL の次世代型電動自転車, WHILL Model A, 2020 年 7 月 17 日閲覧, <https://whill.jp/features>
- 18) 佐藤翔輔, 今井健太郎, 大野晋, 齋正幸, 松尾敏彦, 板原大明, 今村文彦: 徒歩と自動車を組み合わせた津波避難計画の策定-宮城県亘理町における実践-, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, I_1371-I_1375, 2014.
- 19) 国土交通省: 超小型モビリティについて, 2020 年 7 月 14 日閲覧, https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr1_000043.htm
- 20) 国土交通省: 超小型モビリティを活用した事業の運営について(2018 年 4 月 24 日), 2020 年 7 月 17 日閲覧, <https://www.mlit.go.jp/common/001236879.pdf>
- 21) 須永大介, 青野貞康, 松本浩和, 山崎静一, 久保田尚: 市圏郊外部における超小型モビリティを用いた居住地カーシェアリングの導入可能性に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 73(5), I_857-I_868, 2017.
- 22) 竹原裕隆, 藤原淳貴, 氏原岳人, 水柿大地, 阿部典子, 西山基次: 中山間地域における超小型モビリティの利用パターンと導入効果に関する研究: 一美作市・上山地区を事例に-, 交通工学論文集, 5(1), 1-10, 2019.
- 23) 経済産業省多様なモビリティ普及推進会議: 多様なモビリティ普及推進会議とりまとめ(令和元年 12 月 2 日), 2017 年 7 月 17 日閲覧, https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/mobility/pdf/20191202_report_02.pdf
- 24) 溝上章志, 川島英敏, 大森久光, 永田千鶴, 野尻晋, 矢口忠博: 高齢化社会においてパーソナルモビリティが QOL に与える影響に関する実証研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) 68(5), I_141-I_153, 2012.
- 25) 井ノ口弘昭和, 秋山孝正: 超小型モビリティの走行特性に着

目した利用可能性の検討, 交通工学論文集, 第 3 卷, 第 4 号
(特集号 A), p.A_22-A_28, 2017.

- 26) Dirk Helbing and Peter Molter : Social Force Model for Pedestrian Dynamics, Physical review. E, 1995.
- 27) 新谷栄朗, 杉谷亮太, 大枝良直 : 角知憲, パーソナルスペースを用いた自転車・歩行者混合交通モデルに関する研究, 土木計画学研究・講演集, 第 39 卷, 2009.
- 28) 足達健夫, 吉村正浩, 萩原亨, 内田賢悦, 加賀屋誠一 : 歩行者・自転車双方の立場から見た歩道空間における危険感知領域に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集 No.23, no.2, p.567-573, 2006.
- 29) 中川智皓, 今村和樹, 新谷篤彦, 伊藤智博 : パーソナルモビリティ・ビークルの大きさと歩行者の親和性に関する実験的研究, 日本機械学科論文集(C編), 78 卷, 794 号, p.3332-3342, 2012.
- 30) 宮崎恵子, 勝原光治郎, 松倉洋史, 桐谷伸夫 : 車いす搭乗者と歩行者群集の避難実験, 日本航海学会論文集, 第 108, pp129-138, 2003.

(原稿受付 2020. 8.23)

(登載決定 2021.1.9)