

# シナリオ・シミュレータを用いた集中豪雨時の避難計画 の提案と評価に関する研究

Study on the proposal and evaluation of the evacuation plan at the time of  
concentrated heavy rain using a scenario simulator

二神透\*, 濱本憲一郎\*\*, 中久保祐典\*\*\*

Tohru Futagami, Kenichirou Hamamoto Yusuke Nakakubo

\*学博 愛媛大学准教授 総合情報メディアセンター (〒790-8577 松山市文京町 3)

\*\* 学士 愛媛大学大学院 理工学部 生産環境工学専攻 環境建設工学コース (〒790-8577 松山市文京町 3)

\*\*\* 学士 広島市役所 土木課 (〒730-0042 広島市中区国泰寺町一丁目 6 番 34 号)

In order to protect a life from the flood and sediment disaster by the guerrilla heavy rain which are occurring frequently in recent years, it is most effective to perform early refuge action. However, there are also many areas where the independence disaster prevention organization is not formed, and areas whose refuge transmitting information is not enough. Therefore, an external trigger is needed in order to promote the measure to disaster prevention of residents and administration in these areas. In this paper, the refuge scenario simulator was developed for the purpose of a resident, administration, and a specialist regarding disaster prevention as their problems, and application and evaluation are described.

Finally, the subjects of the scenario simulator are discussed.

*Key Words: sediment disaster, flood disaster, refuge simulator, petri-net*

キーワード: 土砂災害, 水害, 避難シミュレータ, ペトリネット

## 1. はじめに

気象庁によると、ここ 30 年間アメダスが観測した 1 時間降水量 50mm および 80mm 以上の短時間強雨の発生回数、日降水量 200mm および 400mm 以上の大雨の発生回数の長期的トレンドは、増加傾向にある<sup>1)</sup>。これを裏付けるように、近年、各所で、時間雨量 100mm を超すゲリラ豪雨による土砂災害・河川災害が発生している。愛媛県においても、平成 16 年の集中豪雨で、新居浜市、西条市を中心に甚大な土砂災害・水害を被った。土砂災害・水害から身を守るためには、早めの避難行動を起こすことに尽きると言われている<sup>2)</sup>。しかし、災害時の心理的特徴により、情報を得て避難行動に移す人は少ない。これらの問題に対して、避難行動のタイミングとリスクを明示するための種々のシミュレータが開発されている<sup>3)5)</sup>。一方、平成 17 年 3 月より、国のガイドラインによる要援護者支援計画が推進されている。要援護者支援計画は、福祉政策であり、共助による早めの避難行動を喚起する効果が期待される。現在、愛媛県下の各

自治体で策定が進められているが、自主防災組織と行政が一体となって推進している自治体は少なく、計画の実効性に問題が残されている。

本研究では、愛媛県今治市玉川町の中村地区と鴨部地区を対象として、豪雨時の避難計画の提案と評価について述べる。中村地区は、土石流危険渓流と急傾斜地崩壊危険箇所が多数存在する地域であり、鴨部地区は蒼社川の浸水想定区域となっている。ゆえに豪雨時には土砂災害や水害の恐れがあり、避難訓練などの防災対策が重要な地域であるといえる。しかし、対象地域の実情は、固定系防災行政無線も無く、自主防災組織も結成されておらず、しかも、避難訓練も実施されていない。一方で、当該地域のハザードマップは、Web 上に公開されているが、著者らのアンケート調査の結果、ハザードマップの認知度は、中村地区で 25%、鴨部地区で 14%と低い。さらに、住民・行政へのヒアリングの結果、要援護者支援計画も進展していないことが明らかとなった。このように、対象地域の防災力を高めるためには、公的な支援(公助)・個人の対処(自助)、地域の協力(共助)の関

係を構築する必要がある。そのための方法論として、本研究では、まず、専門家が関与することによって、自主防災組織の結成を促し、専門家・行政・住民が活発に活動できる環境を形成したいと考えている。そのための支援システムとして、動的な視覚性を特徴とした避難行動シミュレータを活用し、土砂災害・豪雨災害を想定した避難経路や避難開始タイミングといったシナリオ下でのリスクを提示する。最後に、平成16年度豪雨災害の避難行動を再現するとともに、今後の支援システムの活用について述べる。

## 2. 対象地域のデータ採取と基本ネットの構成

### 2.1 対象地域とハザードマップ

本研究では、図-1に示すように、愛媛県の北側に位置する今治市玉川町の中村地区と鴨部地区を対象とする。これらの地域には、平成16年度台風23号の豪雨により、自主避難情報が発令された。図-2に、台風23号に伴う、時間帯降水量・累積降水量を示す。この図より、明け方より降り始めた雨は、ピーク時で時間帯あたり30mmを超える雨量を記録している。そして、累積雨量が150mm



図-1 愛媛県今治市玉川町

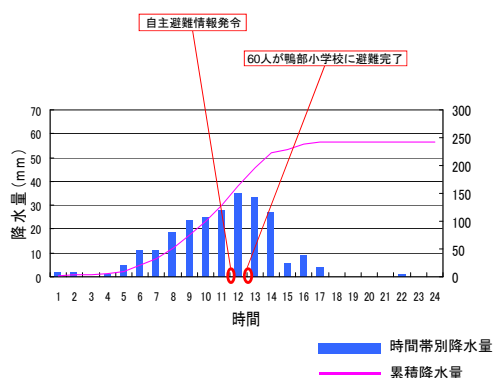


図-2 平成16年度台風23号による時間帯別降水量・累積降水量(玉川町)

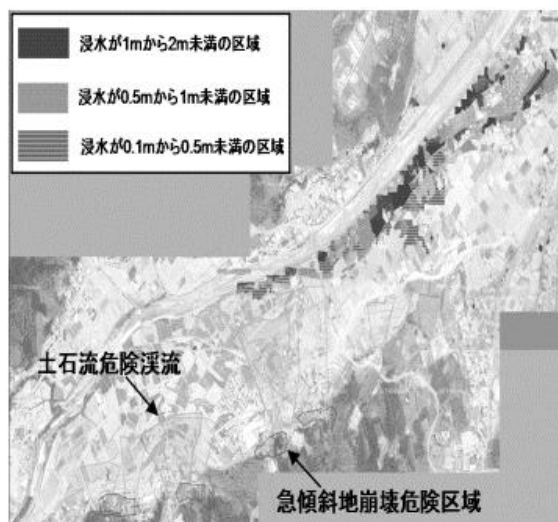


図-3 対象地域のハザードマップ

に達した、午前11時半に、図-3の対象地域のハザードマップの左下から右上に流れる蒼社川の水位が上昇し、避難準備情報が発令された。ヒアリング結果より、約60名の住人が、1時間以内に車を使い避難したことが明らかとなった。幸い、この豪雨による大規模な土砂災害・豪雨災害は発生していない。

対象地域の災害リスクは、前述した図-3のハザードマップに示すように、図左下の中村地区は、土石流危険渓流と急傾斜地崩壊危険箇所が多数存在する地域であり、図右上の鴨部地区は蒼社川の浸水想定区域となっており、浸水が1mから2mの地域も存在する個所がある。今後、ゲリラ豪雨等の豪雨時を想定した土砂災害や水害に対して、避難訓練などの防災対策が重要な地域であるといえよう。しかし、前述したように、対象地域では自主防災組織が結成されておらず、避難訓練や要援護者の所在の把握も行われていないのが現状である。そこで、次節では、著者らが開発しているペトリネット・シミュレータを用いて、避難シナリオ・シミュレータを開発し、住民・行政とのリスク・コミュニケーションとしての活用方法を検討する。

### 2.2 ペトリネットによる避難行動の記述

著者らは、ペトリネットを用いて、中山間地域、都市部における、避難シミュレータを開発している。本稿では、土砂災害、河川氾濫を対象とした避難シミュレータを開発する。はじめに、ペトリネットとは、基本的に、プレース、トランジション、アーク、トークンと呼ばれる4つの要素から構成されている。図-4は、ペトリネットの基本原理を示している。図-4に示す一連の状態推移は、トランジションの発火規則によって起こり、プレースにトークンが存在する状態ならば、当該プレースタ

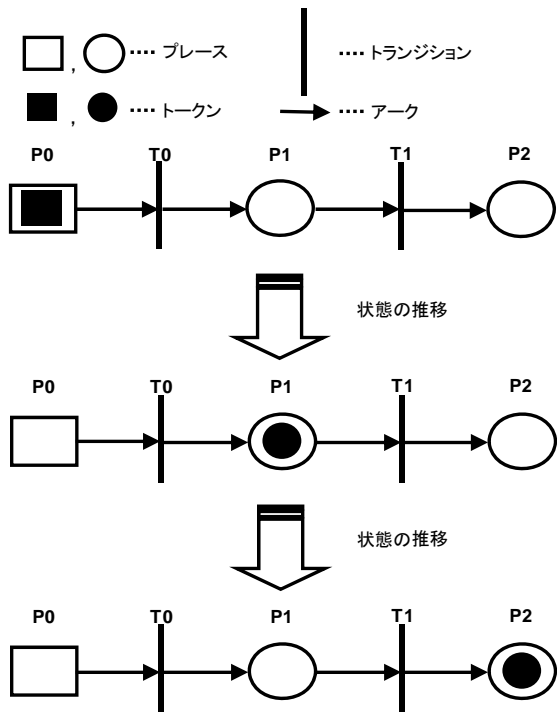


図-4 ペトリネットの基本原則

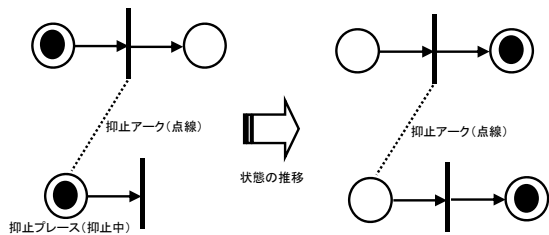
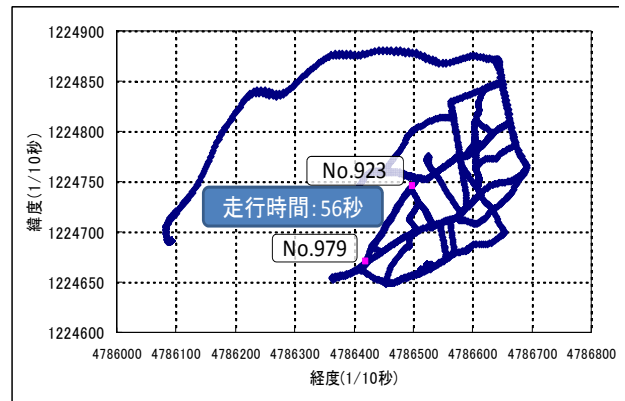


図-5 抑制プレース・アーク

イマーが消費され、トランジションが発火して次のプレースにトークンが移動するという仕組みである。具体的に説明すると、図-4の上段は、四角のプレースP0(プレース0)に黒いトークンが打たれている。この四角のプレースは、世帯を表しており、T0(トランジション0)、T1(トランジション1)は、物理的な避難道路区間を表している。P0には、プレース・タイマーを用意し、中段に示すようにプレース・タイマーが消費されると、T0が発火し、P1にトークンが移動する。最後に、下段に示すように、P1に与えられたプレース・タイマーが消費されるとT1が発火し、P1のトークンがP2に推移する。図-5は、抑制プレース・トランジションによるトランジションの発火阻害を表している。図-5左下の抑制プレースから抑制アークがトランジションに掛けられている。この場合、抑制プレースに与えられたプレースタイマーが消費されるまで、当該トランジションの発火が抑制されている。

以上のように、ペトリネットは、避難者をトークンの状態推移によって視覚的にわかりやすく捉えることがで



No	トランジション配置	緯度	経度	標高	射影距離	斜面距離
922		1224746	4786501	46.12	2838.83	2955.364
923	T	1224745	4786499	46.79	2844.456	2961.03
978		1224671	4786421	57.262	3144.189	3261.912
979	T	1224670	4786420	57.261	3146.43	3264.153
980		1224669	4786420	57.328	3148.169	3265.893

図-6 GPS データから避難 Petri-net 生成事例

き、また、阻害要因を災害による経路阻害として視覚的に捉えながら構築・修正を行うことができるため、住民や行政と避難行動について考える上で、種々の意見・批判を引き出せると考えている。

### 2.3 経路データの取得とネットの記述

シミュレータ内における避難行動にかかる移動時間は、プレースタイマーにより表現する。プレースタイマーとは、トークンの状態推移にかかる時間のことで、トークンはプレースタイマーに設定した時間になると、トランジションが発火して次のプレースに移動する。ヒアリングの結果、平成16年度の豪雨災害時には、鴨部地区の住民は車で避難をしている。この理由は、鴨部地区から避難場所までの距離が1km近くあることと、避難した住民の多くが障害者であったことによる。そこで、徒歩あるいは、車での避難を想定するとし、徒歩・車のプレースタイマーを採取するために、徒歩避難の場合を想定しGPSを持ちながら現地を歩いてデータを採取した。一方、車による避難を想定し、車にGPSを搭載して現地を走りデータを採取した。このGPSデータから、徒歩あるいは車による1秒間隔の緯度・経度・標高・時刻の経路データを取得している。なお、GPSを用いる理由は、経路の地形や勾配による移動時間への影響を考慮できるためである。ここで、取得した経路データは、著者が開発した、ペトリネット用データ作成システムを用いて、基本データを作成する。図-6の上側は、車で採取したGPSデータの緯度経度を図示している。下表は、別画面に表示されるGPSデータのエクセル表示であり、1列目がポイントNo、2列目はトランジションを置くか(T)置かないか(空白)を入力する欄である。3列以降は、緯度経度等のデータ欄である。この図では、

No.923 と No.979 へトランジションを配置している、これらのトランジションの中間にプレースが自動的に生成され、移動時間 56 秒がプレースタイマーとして入力される。この作業を、全ての経路について実行すると、Petri-net 避難シミュレータの基礎データを作成することができる。同様に、徒歩経路 GPS データ（車が進入できない経路がある）を用いて、避難経路ネットワークを作成した。交差点の経路選択については、避難場所までの距離を考慮して、選択確率を設定した。ここでの選択確率とは、ある地点における複数の代替経路がある場合に、それらを選択する確率を、経路から避難場所までの距離に反比例する値で設定していることを意味する。

### 3. 豪雨時の土砂災害・河川氾濫時の避難シナリオ

#### 3.1 土砂災害危険地域への適用と評価

本節では、中村地区を対象とした土砂災害のシナリオ分析を行う。図-7に対象地域でのシミュレータの初期画面を示す。基本条件としては、地図に記された人家から293世帯を世帯プレースとして配置（世帯単位で避難すると仮定）し、対象地域の避難場所である図中央右下の鴨部小学校の3か所の入り口を避難所プレースとして配置する。次に、シナリオ条件として、図-7に示すハザードエリア（土石流危険渓流や急傾斜地崩壊危険箇所）に土砂災害が起きると想定する。そして、住民の避難行動の遅れや避難経路の違いによる人的被害の程度を把握するため、次の2つのシナリオを用意する。

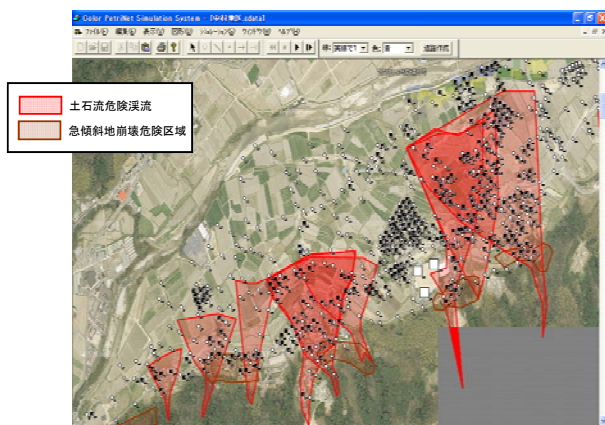


図-7 シミュレータ初期画面 (t=0)

1 目目のシナリオでは、避難行動時にシミュレータの背景画像に重ねてあるハザードマップを考慮せず、避難場所までの最短の経路を利用して避難行動をとるように設定し、避難開始タイミングの違いによる人的被害の程度を見る。

2 目目のシナリオでは、避難行動時にシミュレータの背景画像に重ねてあるハザードマップを考慮し、初めからハザードエリア内にある世帯は、最短でそのエリアから脱出できるように設定し、避難途中の経路にハザード

エリアがある世帯は、そのエリアを避けながら避難行動をとるように設定し、避難開始タイミングの違いによる人的被害の関係を分析する。なお、2つのシナリオにおける人的被害の程度は、ハザードエリア内で土石流やがけ崩れが発生する時間を想定し、そのエリア内の発災によりその経路が通行不可（切断阻害）になることによって、発災後の避難行動が阻害された世帯を全世帯数で割った残留避難者率として表現する。100回のシミュレーションを実施し、その結果、ハザードマップを考慮しないときの全世帯の避難完了時間は18分となった。そこで、2つのシナリオにおける避難開始タイミングは、土石流や土砂崩れが発生する前の1分ごとに変化させ0分から18分までの残留避難者率の変化を見る。

はじめに、避難行動時にハザードマップを考慮しない場合におけるシナリオ（以下、シナリオ(1)とする）についての分析結果を図-8に示す。図-8の上側グラフより、災害が発生する18分前までに避難を開始した場合、発災後の切断阻害による残留避難者率は0%であり、全世帯が避難所まで避難することができる。しかし、発災の17分前から避難を開始した場合、発災後の切断阻害による人的被害が発生し始め、最終的に1分前から避難を開始した場合、全世帯の約70%もの世帯が人的被害を受けてしまう。

次に、避難行動時にハザードマップを考慮した場合におけるシナリオ（以下、シナリオ(2)とする）についての分析結果を以下に述べる。図-8の下側グラフより、発災の6分前までに避難を開始した場合、発災後の切断阻害による残留避難者率は0%であり、全世帯が避難所ま

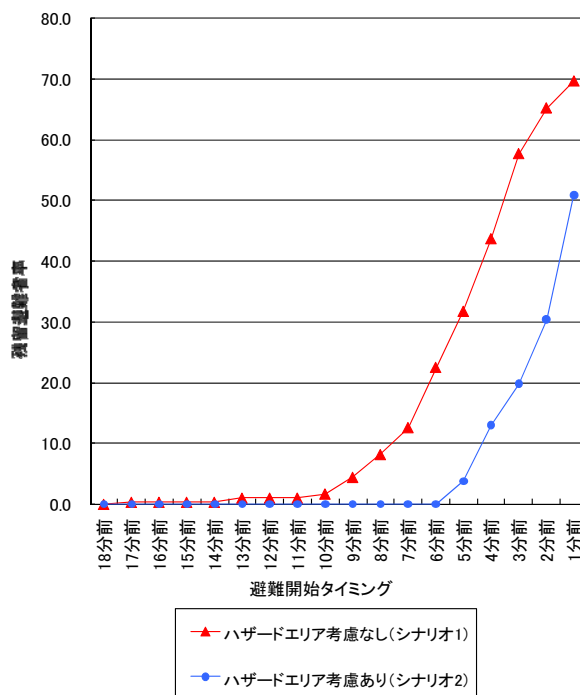


図-8 ハザードエリア考慮の有無による残留避難者率

で避難することができる。しかし、発災の5分前から避難を開始した場合、発災後の切断阻害による人的被害が発生し始め、最終的に1分前から避難を開始した場合、全世帯の約50%もの世帯が人的被害を受けてしまう。

さらに、これらのシナリオの分析結果についての比較を以下に述べる。図-8より、シナリオ(1)とシナリオ(2)の発災の3分前に避難を開始した場合に残留避難者率の差が最大になり、その差は約40%にもなる。また、シナリオ(1)では発災の1分前に避難を開始した場合の被災率は約70%であり、一方のシナリオ(2)でのそれは約50%であり、その差は20%にもなる。これらのことより、シナリオ(2)の方がシナリオ(1)よりも避難開始タイミングによる人的被害の発生が遅くなり、同じ避難開始タイミングでも経路阻害による人的被害の程度が低くなることがわかる。

以上を整理すると、初めからハザードエリアの中にある世帯は、最短でそのエリアから脱出し、避難途中の経路にハザードエリアがある世帯は、そのエリアを避けながら避難行動をとることによって、避難開始タイミングが遅れた場合でも経路阻害による人的被害の程度を低くすることがわかった。この結果は、住民、行政を含めたワークショップを開催し、本システムを用いて様々なシナリオを提示するといったリスクコミュニケーションを行う際に重要な視点となろう。また、リスクコミュニケーションを行うとき、各世帯における避難開始タイミングや避難経路による人的被害が発生する影響は違うと考えられるため、個別のシナリオについてシミュレーションを行う必要がある。この点に関しては、開発したシステムを用いて、任意の世帯のみのシミュレーションを実行することで対応可能である。

### 3.2 浸水災害危険地域での適用と評価

本節では、蒼社川の浸水ハザードである鴨部地区を対象とした浸水災害のシナリオ分析を行う。3.1と同様に、図-3 右上の鴨部地区を対象にシナリオを作成した。図-9 に、対象地域でのシミュレータの初期画面を示す。シミュレータの基本条件として、地図に記された234世帯を世帯プレースとして配置し、対象地域の避難所である鴨部小学校を避難所プレースとして配置する。次に、シナリオ条件として、図-10に示すハザードエリア(浸水想定区域)が浸水し、0.1m~0.5m未満の区域に速度制約阻害を設定し、0.5m~2.0m未満の区域に切断阻害を設定し、ハザードエリア考慮無し(シナリオ(1))、ハザードエリア考慮あり(シナリオ(2))の場合について、時間の変化と収容率の関係を分析した。ここで、速度制約阻害とは水深と流速の影響による歩行困難を意味するが、ハザードマップには水深情報しかないため、プレースタイマーを2倍に増やすことで表現している。3.1と同様に、100回のシミュレーションを実施し、その結果、ハザードマップを考慮しないときの全世帯の避難完了時間

は20分となった。そこで、2つのシナリオにおける避難

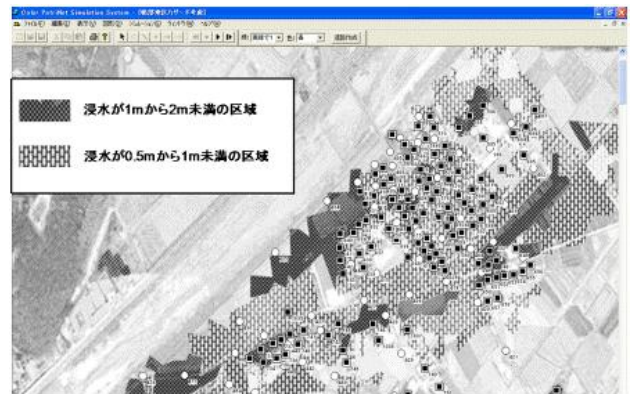


図-9 シミュレータ初期画面 (t=0)

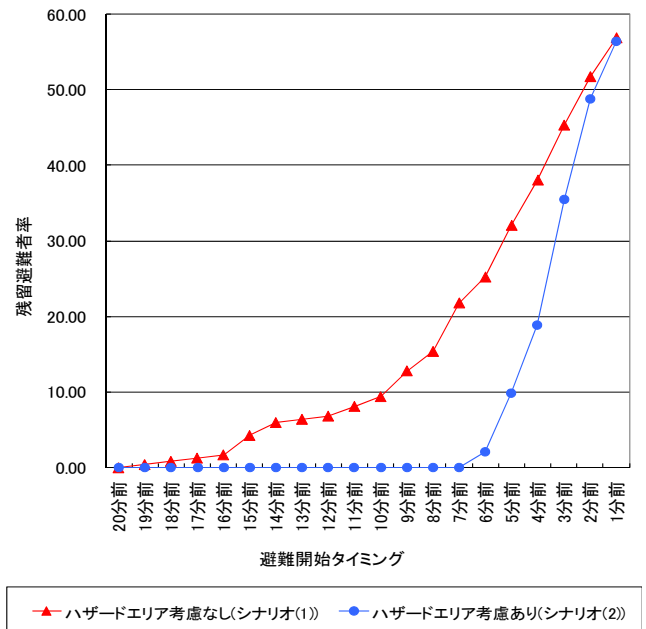


図-10 ハザードエリア考慮の有無による残留避難者率

開始タイミングは、ハザードマップと同様の浸水深さとなることを仮定(浸水の動的現象は考慮していない)し、1分ごとに変化させ0分から20分までの残留避難者率の変化を見る。

シナリオ(1)では0.5m~2.0m未満の区域による切断阻害が発生する19分前に避難を開始した場合から残留避難者が発生した。それに対して、シナリオ(2)では切断阻害が発生する6分前に避難を開始した場合から残留避難者が発生した。また、2つのシナリオの残留避難者率の差が最も大きくなった避難開始タイミングは、切断阻害が発生する6分前であり、その差は約23%であることが明らかになった。これらのことより、シナリオ(2)の方がシナリオ(1)よりも避難開始タイミングによる人的被害の発生が遅くなり、同じ避難開始タイミングでも経路阻害による人的被害の程度が低くなることがわかる。

以上を整理すると、土砂災害の場合は、初めからハザードエリアにある世帯はそのエリアから脱出する必要があるが、水害の場合はその限りでなく、切断阻害を受けた世帯は、自宅の2階や近所の高い場所に避難することもでき、それらの世帯を避難世帯とみなせば、残留避難者率が減少することになる。ただし、豪雨の状況によっては、浸水深が予測値よりも大きい場合も想定される。さらに、夜間での避難は危険が伴うため、行政・住民・専門家が、地域と災害特性に応じた避難の在り方を検討する必要がある。

### 3.3 水害におけるリスクコミュニケーションへの利用可能性

前述したように、土砂災害・河川氾濫ハザードマップを利用したシナリオ・シミュレーション結果より、避難開始タイミングや避難経路の違いによる人的被害の発生状況を視覚的に提示可能であることを述べた。本節では、ヒアリング調査によって得られた、平成16年度豪雨災害時の避難阻害行動をシナリオに与える。

まず、鴨部地区の障害者支援団体会長へのヒアリング調査の結果、2006年の台風23号による豪雨時、自主避難情報を有線電話で知った会長は、鴨部地区の要援護者11人を3回に分け、各自宅から避難場所である鴨部小学校までを車で避難支援している。その際に3往復目に図-9の右下に示す避難経路が、河川氾濫ではなく、山側から流れ出た小川の流水反乱による冠水のため、車を徐行して進まなければならなかったということがわかった。この事例を要援護者の避難支援シミュレーションを用いて再現する。ここで、要援護者避難支援モデルを図-11に示す。このネットは、P3の支援者が、避難経路、T3、T0、T1を移動し、要援護者P4とともに、避難場所P5に移動するネットである。このとき、冠水した経路の速度制約阻害は、車の速度を10(km/h)と仮定して設定した。経路の冠水による速度制約阻害がかかっていない1往復目と2往復目のシミュレータの実行結果より、避難完了時間は253秒であった。また、経路の冠水による速度制約阻害がかかっている3往復目のシミュレータの実行結果より、避難完了時間は579秒であった。これらの実行結果から、経路が冠水した場合は5分以上も多く避難に

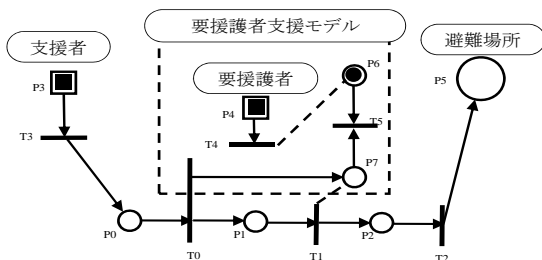


図-11 要援護者支援ネットの記述

要する時間がかかることがわかった。

以上より、ハザードマップから得られる情報を基にシミュレーションを行うだけでなく、それ以外の情報もシミュレータに反映させることで、より地域のニーズに合ったリスクコミュニケーションを行うことが可能となる。また、ペトリネット・シミュレータは3.2節で述べたように、阻害の追加や要援護者支援ネットといったサブネットを追加することにより、種々のシナリオを想定し、シミュレータに反映させることが可能である。

## 4. 終わりに

本稿では、豪雨災害リスクが高いが、防災計画が遅れている地域を対象として、避難行動シミュレータを開発し、具体的な適用事例について述べた。それらの結果、避難を開始するタイミングや避難経路によって、経路阻害による人的被害の発生度の違いを示すことができた。また、ペトリネットを用いた避難行動シミュレータを住民や行政とのリスクコミュニケーションのツールとして用いることの有用性についても示すことができた。今後の課題としては、本研究の成果を住民や行政とのリスクコミュニケーションのツールとして、いかに活用できるかという点にある。そのために、今後、行政・住民とともにワークショップを開催し、開発したシステムをリスクコミュニケーションのツールとして、豪雨時の土砂災害・河川災害を想定した総合的な避難計画の策定に向けた合意形成を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 気象庁 HP : <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/faq/faq1.html>.
- 2) 及川康, 藤川直毅: 豪雨進展時における住民対応行動の開始タイミングに関する分析, 土木学会 第1回防災計画研究発表会, pp.1-7,2006.
- 3) 柿本竜治, 山田文彦, 田中健路, 山本幸: リスクコミュニケーションを通じた中山間地域の防災力向上に適した支援システムの構築, 土木計画学研究・講演集, No.40, CD-ROM 4p,2009.
- 4) 二神 透, 木俣 昇: 中山間地域の救急・避難計画支援のためのシナリオ・シミュレータの適用に関する基礎的研究, 土木計画学研究・講演集, No.32, (363), CDROM 4p,2006.
- 5) 二神 透, 木俣 昇: 中山間地域の救急・避難計画のためのシナリオシミュレーションの開発, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp.89-96,2005.
- 6) Tohru Futagami, Noboru Kimata: Study on an Available System by the Portable GPS for the Formation of Resident Participation to a Refuge Planning Scenario, Journal of Applied Computing in Civil Engineering Vol.17, pp.327-337,2008. (2010年8月6日受付)