

I-5 背景画像上での避難ペトリネットシミュレーションへの プローブ情報技術の活用化研究

A study on practical application of the probe information technology to the refuge Petri-net simulation on a background picture

二神 透¹・木俣 昇²

Tohru Futagami, Noboru Kimata

抄録：2004年に発生した新潟中越地震で問題となった中山間地域の防災計画を考える上で、避難計画は人命を確保する意味で重要な役割を担う。しかし、これまで中山間地域を対象とした防災計画は、ほとんど議論されておらず、抜本的な防災計画の再考が求められている。

本論文では、中山間地域の避難計画に着目し、背景画像上で避難ペトリネットシミュレーションを開発することにより、災害シナリオの作成、阻害シナリオの追加・解除といった、空間変容対応型のシステムを提案する。これらのシナリオペトリと、プローブ情報の利用可能性に着目し、この利用技術の確立について検討を行う。

Abstract: When considering the disaster prevention plan in intermediate and mountainous area which became a problem in the Niigata Chuetsu earthquake which occurred in 2004, a refuge plan bears an important role in the meaning which a human life secures.

However, it does not argue about most disaster prevention plans for intermediate and mountainous area, but reconsideration of a radical disaster prevention plan is called for until now.

In this paper, space change correspondence type systems, such as creation of a calamity scenario, and an addition and release of a prevention scenario, are proposed by developing a refuge Petri-net simulation on a background picture paying attention to the refuge plan in the intermediate and mountainous area.

Establishment of this use technology is considered paying attention to these scenario Petri-net and the availability of probe information.

キーワード：ペトリネットシミュレーション、プローブデータ、避難計画、中山間地域防災

Keywords : Petri-net simulation, Probe-data, Refuge planning, Intermediate and mountainous area

1. まえがき

著者らは、背景画像上でのペトリネットシミュレーションの開発を試み、地震時緊急車両走行の出勤と活動システムの点検・評価に関する研究や、地震時の建物内・市街地避難計画の阻害要因のシナリオと、それらの即時検討性について論じ、ペトリネットの計画支援の有効性について検討を行っている¹⁾⁷⁾。ここで、従来、著者らがペトリネットを用いている背景画像とは、計画対象とする空間の住宅地図といった電子地図である。この背景画像を、ペトリネットシミュレータの機能を用いて表示し、施設・道路・避難路を確認しながら、グリッド線を用いて、プレース、トランジションを配置しながらペトリネットを構築する。この、背景画像を用いる利点は、視覚的かつリアリティーを有した形でペトリネットの構築が可能となり、構築した計画の評価・批判を即時的に実行可能な点にある。本研究では、中山間地域を対象としているため、情報量の

多いカラーの航空写真を背景画像として用い、ハザード情報や、周辺画像を参照することにより、災害時の交通・避難に関する阻害要因の発見といった、課題対応型の計画支援が可能となると考えている。

中山間地域の避難計画と、都市部の避難計画を考える場合、両者の大きな相違は、地形的制約や阻害のタイプにある。中山間地域では、住宅から避難場所への経路が、車で移動可能な経路、徒歩に限定される経路と分かれる⁸⁾。さらに災害阻害の程度によれば、車の移動を諦め、徒歩へと移動手段が変わる場合や、移動手段の無い高齢者を迎えに出向く、互助型避難の形態も想定されよう。移動にかかる時間は、車や徒歩の速度で算定できるが、中山間地域の場合、地形的制約である高度差による勾配の影響を大きく受けると考えられる。

そこで、本研究では、プローブビークルならびに携帯GPSを利用したプローブ情報の利用可能性、すなわち、避難シナリオペトリネットとの関連より、中山間

1：正会員 学博 愛媛大学 講師 総合情報メディアセンター

(〒790-8577 松山市文京町3, Tel :089-927-9837, E-mail : futagami@dpc.ehime-u.ac.jp)

2：正会員 工博 金沢大学大学院自然科学研究科 教授 工学部土木建設工学科

地域の避難計画を考える上でのプローブ情報の利用技術の確立について検討を行い、今後の課題を整理する。

2. 中山間地域避難シナリオの基本ペトリネット構築

(1) ペトリネットの基本原理

ペトリネットとは、図-1に示すように、プレース(○)とトランジション(|)、アーク(入出力:→、抑止:⋯→)を要素とする、グラフ形式による対象系の記述をいう。図-1は、 t_1 からなるトランジション(基本事象)である。このトランジションへの入力プレースには、トークン(●)が打たれている。 p_1, p_2 は、入力条件を表している。一方、 p_3 のプレースは、トランジション t_1 に、破線の矢印が引かれている。この、 p_3 のトークンは、入力条件 p_1, p_2 への抑止条件となっている。このように、事象を入力条件、抑止で表し、事象の推移は、トランジションが発火することにより、 p_4, p_5 の出力状態へ推移する。

図-2は、抑止の解除と、それにともなう状態の推移を表している。この図を連鎖と障害事象で捉え、図-2は、ペトリネットで記述したシナリオであり、抑止の解除とは、事象の推移を障害する抑止条件であり、この抑止が解除されることにより、逐次事象の推移が連鎖的に行われる。

(2) 避難シナリオの部分ネット

中山間地域の避難シナリオを考える場合、開始、移動、分岐、合流、互助、引返し、阻害といった部分ネットを考える必要がある。中山間地域の避難シナリオとは、これらの部分ネットの結合により構成され、ペトリネットの結合化は、シナリオの拡大化、精緻化を担保し、この特徴が、ペトリネットシナリオによる課題解決型の支援システムとしての実効性・有効性を保証している。ここで、基本となる部分ネットについて述べる。図-3は、避難開始ネットと歩行移動ネットを表している。右のトークンで示される避難者は、避難情報を入力条件として、移動を開始することになる。このときの、空間事象の時間移動は、右図のプレースタイマを与えることにより、プレースタイマが消費され、トランジションの発火に伴い、出力状態へトークンが移動することによって記述される。避難情報についても、部分ネットを構築することにより、事象を精緻化できる。図-4は、高齢化が進む中山間地域に見られる、独居老人世帯の歩行困難避難者を、車で駆けつけて互助的に避難する互助ネットを表している。避難者は、避難行動のための情報と、駆けつけ車両の到着にそれぞれトークンが打たれるとトランジションが発火し、避難を開始することになる。図-5は、避難

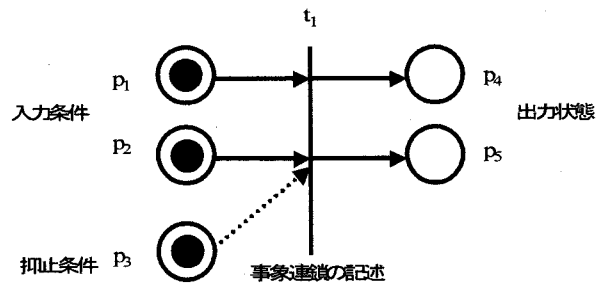


図-1 ペトリネットの基本事象と状態推移

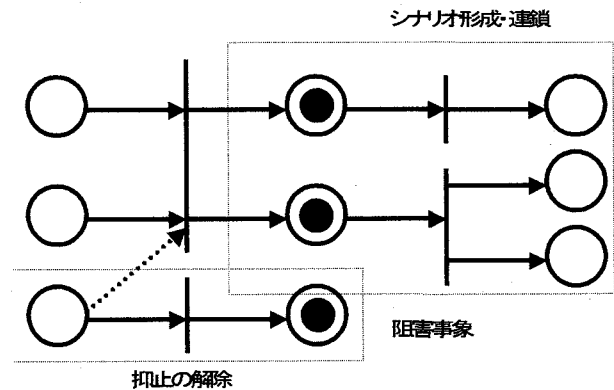


図-2 シナリオによる事象の連鎖と阻害事象

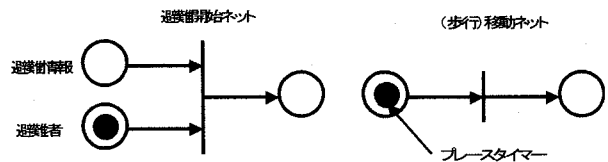


図-3 避難開始ネットと歩行移動ネット

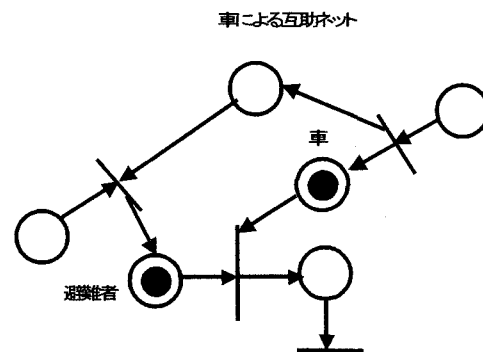


図-4 互助ネット(車による互助移動)

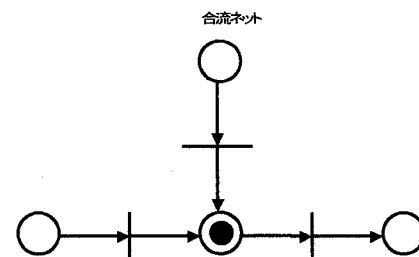


図-5 ノードにおける合流ネット

所へ移動する際に、住宅から道路への合流や、支線・末線・幹線道路の合流ネットを表している。

図-3から図-5で説明した部分ネットは、避難者が住宅から避難を開始し、避難経路を通り、避難場所へ移動する基本ネットとなる。以上のように、避難者をトークンで記述し、空間移動をプレースとトランジションの入出力条件で記述することにより、トークン(避難者)の移動を記述できることがわかる。

図-6は、障害事象を考慮した場合のシナリオと事象の連鎖を表している。避難者は、GT(カラー生成トランジション)により、確率的なカラー属性を付与される。つぎに、ST(選択トランジション)によって、付与されたカラー属性を選択し、経路が切断により車・徒歩で通行不可能な事象、あるいは移手段が徒歩に変わるが通行可能な事象、そして、抑止がかかっていないトランジションは、障害があっても通行可能で移手段も変更の無い事象を表している。

図-7は、図-6で説明したように、GT(カラー生成トランジション)、ST(選択トランジション)を用いて経路選択の確率を生成し、抑止を掛けることにより経路選択を与える部分ネットである。

(3) 背景画像上での避難シナリオの構築

対象地域の背景画像⁹⁾上から入手可能な情報は、図-8に示すように、幹線道路・支線道路・末線道路といった移動経路、合流部、避難場所位置、避難場所入り口、住宅などの情報を読み取ることができる。図-8より、幹線道路・支線道路については、車での移動が可能と想定できよう。一方、この図からは、末線道路が車での通行可能か否かの識別はできない。図-9の避難場所背景画像からは、住宅、経路情報、避難

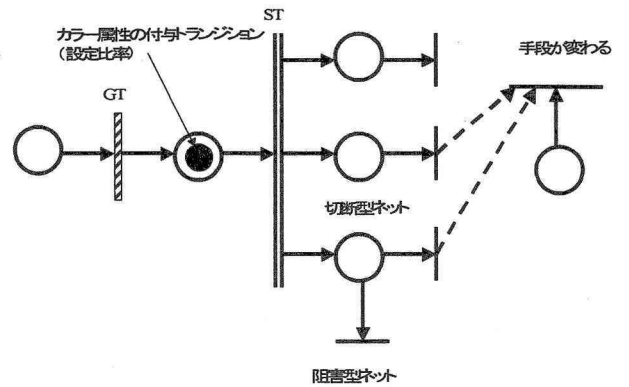


図-6 シナリオによる事象の連鎖と障害事象ネット

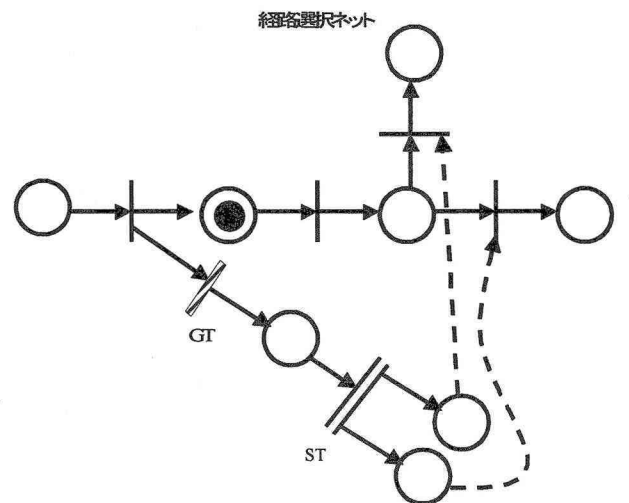


図-7 経路選択部分ネット



図-8 背景画像上の道路情報



図-9 背景画像上の避難場所周辺情報

場所、避難場所入り口の情報を読み取ることが可能である。しかし、阻害情報、移動手段の変更に伴う移動速度については、これらの背景画像からは入手することができない。そこで、次章で、プローブ情報技術を用いて、避難ペトリネットとの連携化の確立を試みる。

3. プローブ情報技術による経路情報の収集

(1) プローブ情報技術の概要

図-10は、著者らのプローブビークルと計測機器を表している。対象となる中山間地域の車両は、枝状に伸びる末線道路の終端に住宅が立地しており、普通乗用車では進入できない幅員しか確保されて無い場合が多く、地元住民の多くが畑で農野菜を栽培しているため軽トラックの所有率が高いため、プローブビークルとして軽自動車を準備した。計測機器は、データテックの車載用GPS装置と、データ収集用ノートパソコン、走行時の道路状況映像撮影のためのビデオカメラ、中山間地域の位置確認用のカーナビゲーションから構成されている。

表-1は、プローブビークルを用いて採取した18秒間のデータ群である。時刻、緯度、経度、海拔高度、受信使用衛星数のデータがワンセットになっている。これらのデータが、時間間隔1秒毎に取得される。一方、プローブビークルが進入できない、末線道路については携帯GPSデバイスを用いて徒歩による移動速度を計測した。久万高原町(旧1町3村:久万町、美川村、柳谷村、面河村)の民家一軒一軒に至る全道路を走破した¹⁰⁾⁻¹¹⁾。走行日は2002年10月1日~11月25日の全26日で、久万町14日間、美川村5日間、柳谷村4日間、面河村3日間である。走行総距離は、約4,800km、総データサイズ85Mbである。

図-11は、プローブを用いて採取した単位時間毎のドット・データとノードの関係例を表している。図中の連続するドットは、一秒毎のプローブビークルの位置情報の軌跡を表している。一般的には、道路のノードを交差点で代表される2点間のリンクで定義したり、あるいは、等区間のリンク長でノードを定義することが多い。しかし、本研究では、住民の避難時間を問題としているため、住宅の緯度経度や、道路勾配に応じたノードを定義する必要がある。換言すれば、単位時間毎のドット・データを活用すれば、上述した住宅位置や道路形状・勾配に応じてネットワークを定義できるため、ペトリネットのプレースの配置と対応したプレースタイマの値を設定することができる。

(2) データ収集方式と地図情報化

2. (3)で述べたように、中山間地域の背景画像上からは、幹線道路、支線道路、末線道路の道路レベルに応じた経路情報の入手が一応可能である。しかし、末線道路の移動手段については確認ができない。プローブ情報は、実際に現地を走行あるいは、歩くことに

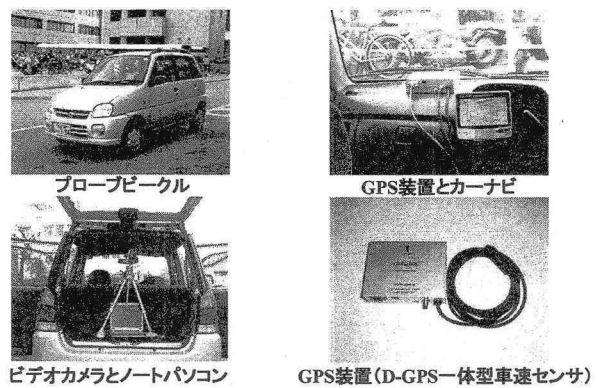


図-10 プローブビークルと計測機器

表-1 単位時間毎の移動点データ

13時18分25秒から42秒のGPSデータ

時刻	緯度	経度	海拔高度	使用衛星数
41825	1212983.84	4786446.754	623.4	4
41826	1212983.629	4786446.844	623.5	4
41827	1212983.444	4786447.01	623.5	3
41828	1212983.764	4786447.194	623.5	3
41829	1212983.831	4786447.671	623.5	4
41830	1212984.078	4786448.362	623.4	5
41831	1212984.616	4786448.996	623.4	4
41832	1212985.502	4786449.71	623.3	4
41833	1212986.869	4786450.423	623.3	4
41834	1212987.485	4786451.099	623.2	5
41835	1212987.708	4786451.581	623	5
41836	1212988.091	4786451.974	623	3
41837	1212987.79	4786452.028	622.8	5
41838	1212987.443	4786451.992	622.8	4
41839	1212986.737	4786451.917	622.8	4
41840	1212987.192	4786452.269	622.7	4
41841	1212987.702	4786452.912	622.8	5
41842	1212987.916	4786453.422	622.8	2

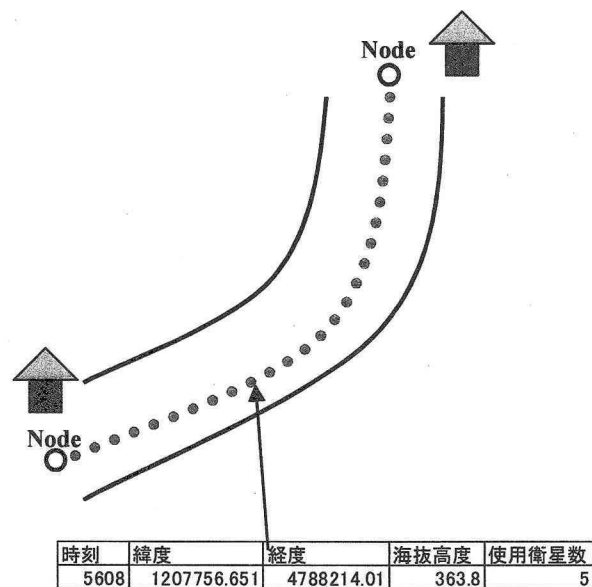


図-11 ドット・データを用いたノードの定義例

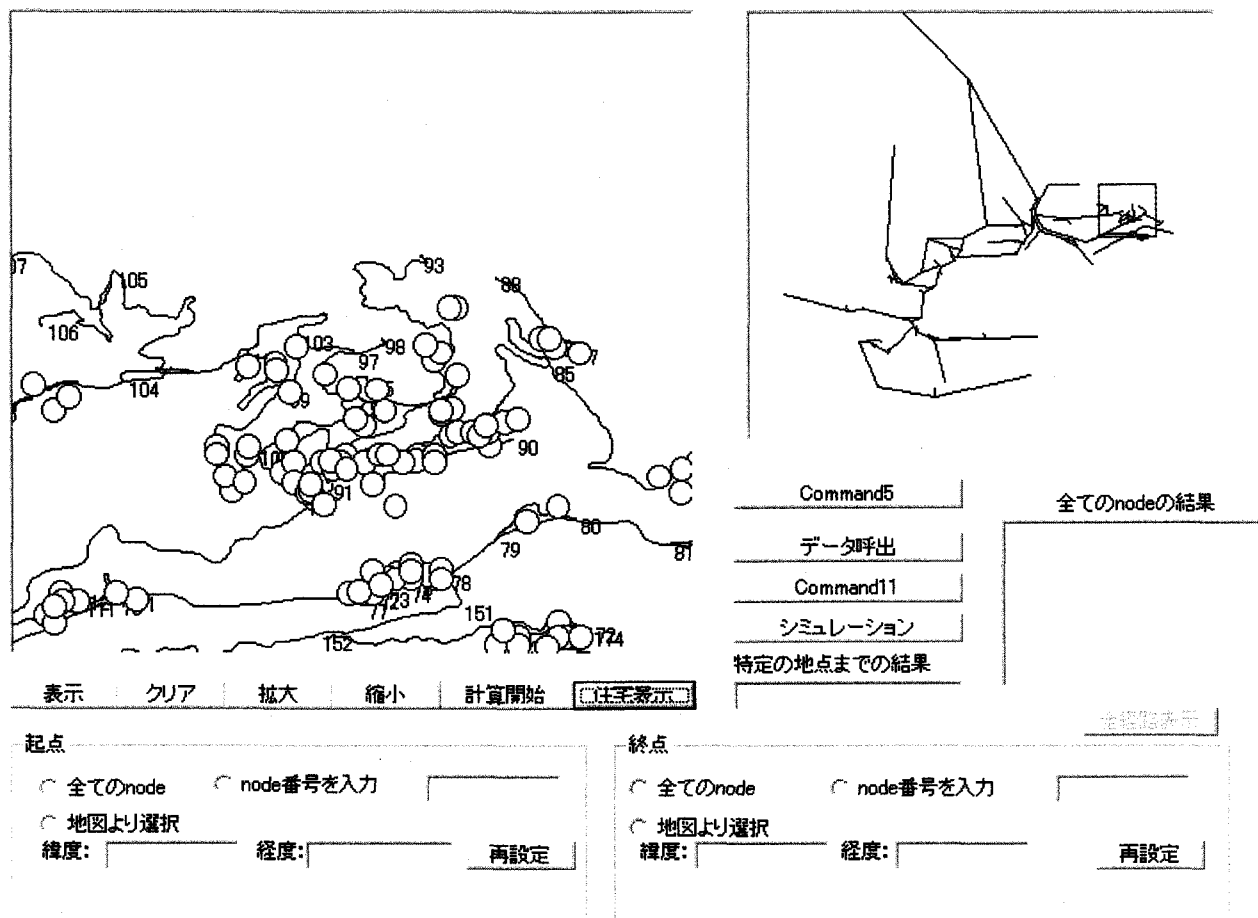


図-12 プローブデータの地図化

より移動手段別速度を実測する。これらのプローブ情報は、背景画像上で逐次的にペトリネットを構築する方法と対応する形で活用することが効率的となる。そこで、両者の連携について述べる。

はじめに、プローブデータを、緯度経度情報を表示可能な電子地図上にプロットする。つぎに、背景画像上から、抽出した幹線道路ネットワークのノードの緯度経度をプローブデータのドットデータと参照することにより、ノード間のデータ群（緯度経度、海拔高度）を抽出すれば、図-11に示したような、ドットから構成されるリンクデータを抽出することができる。

図-12は、著者らが作成したプローブデータの地図化システムを表している。左画面は、久万高原町旧柳谷村中津の集落のプローブデータである。黄色の丸印は、住宅を表している。それぞれの住宅には、家族構成、性別、年齢等の避難者の属性をデータベース化している。これらのデータは、避難ペトリネットのプレースの発生トークン数に対応している。このプローブデータの地図化システムより、ノード間の移送手段別速度を入手できるため、2.の図-4に示した移動速度をプレースタイムとして設定することができる。その他の部分ネットにおける、タイムの設定については、次章で具体的に述べる。

4. プローブデータの基本活用形

(1) プレースタイムの設定

中山間地域の避難ペトリネットシミュレーションを構築するためには、車移動経路、徒歩移動経路を特定するとともに、ペトリネットのプレース間の移動時間をプレースタイムとして設定する必要がある。これらのデータについては、図-12のプローブデータの地図化システムを用いて、直接設定することができる。しかし、2.の図-6に示したように、障害が発生し、車から徒歩へと移動手段が変更された場合は、徒歩の移動速度を設定する必要がある。しかし、今回採取したプローブデータは、車両走行可能経路と、歩行のみ通行可能経路のデータを採取しているため、車両走行可能道路の歩行速度については、歩行速度 V と勾配 θ の実測を行い、それらの関係より上り勾配歩行速度式(1)、下り勾配歩行速度式(2)を採用することとした。

$$V_{as} = -1.1498 \sin^2 \theta - 0.1814 \sin \theta + 1.4028 \text{ m/s (1)}$$

$$V_{ds} = \text{const}(1.4) \text{ m/s (2)}$$

ただし、被験者が21歳の男子に限定されているため、

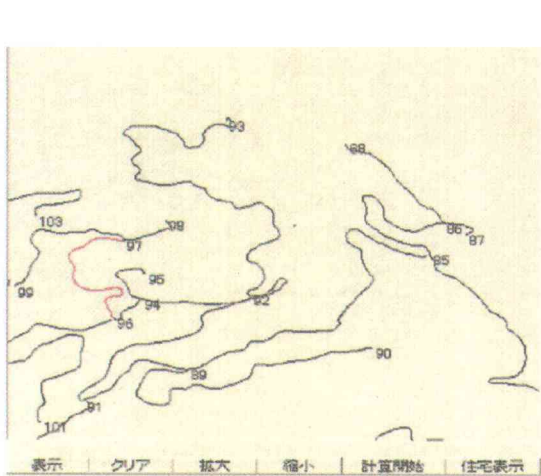


図-13 徒歩ネット作成のための道路参照

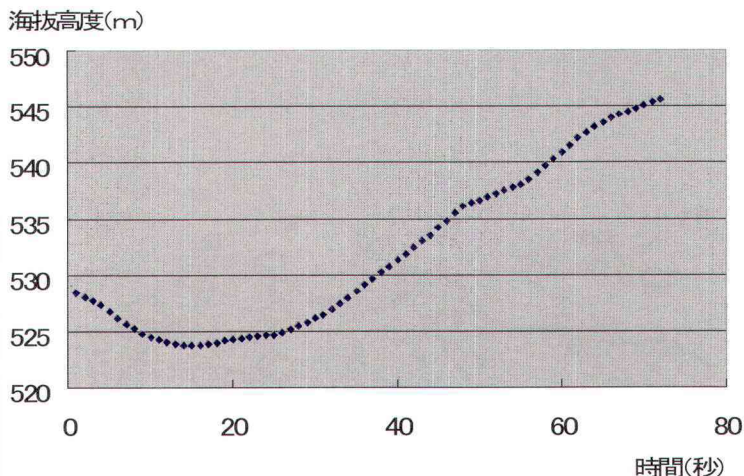
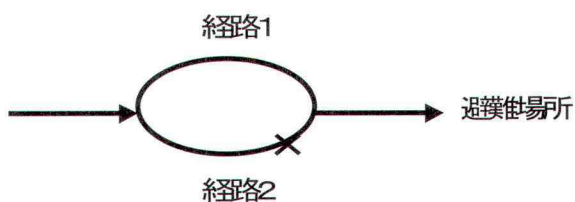


図-14 道路リンクの海拔高度情報(ノード96から97)

年齢属性別の補正值を用いて、属性別の移動速度を推定する¹²⁾。

以上より、阻害による交通手段の変更に伴う徒歩速度を避難ペトリネットシミュレーションに反映させるためには、勾配を考慮した徒歩ネットを構築する必要がある。そこで、図-12のプロープデータの地図化システムを用いた歩行用ネットの構築について述べる。図-13は、図-12のシステムを用いて、地図上のリンク区間(ノード番号96から97)を選択し、ピンク色で選定区間を表示している。図-14は、選定したリンク区間のプロープデータの海拔高度を表示している。この図より、背景画像では入手できない避難経路の起伏状態を数値的に明示できるため、この図を用いて、徒歩速度を規定する勾配に応じた、プレース、トランジションの設定と、式(1)、(2)を用いた徒歩移動速度の設定が可能となる。



Case1 阻害無 $t_1 > t_2$ Case2 阻害有 $t_1 < t_2$

(2) 経路選択確率

一般的に経路選択確率は、経路の所要時間によって与えられる。しかし、中山間地域の避難ペトリネットシミュレーションを構築する場合、2.の図-6で示したように避難の阻害場所と程度によって、移動手段が変更となる可能性があるため、経路の所要時間を算定しなおす必要がある。ここでも、プロープデータを活用することにより、シナリオに対応した所要時間が算定できるため、カラートークンの確率設定による経路選択確率の付与が可能となる。

例えば、図-15のCase1では、避難阻害がないと想定すれば、経路の所要時間 t について、経路1より経路2の値が大きい。この場合、経路1の選択確率が高くなる。一方、図の経路2の×印で阻害が発生した場合、車から徒歩へ移動手段が変更となったとする。このときの経路所要時間は、経路2のほうが大きくなったとすれば、選択確率が逆転する。しかし、これらのシナリオは、事前に阻害情報が既知の場合を想定している。しかし、これらの阻害事象の情報がある場合と

図-15 2経路選択と阻害シナリオ

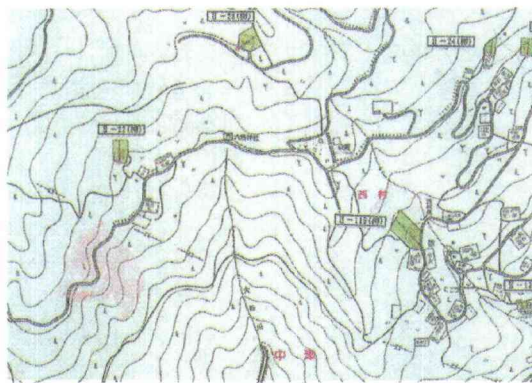


図-16 急傾斜地土砂崩壊危険箇所



図-17 災害・周辺画像

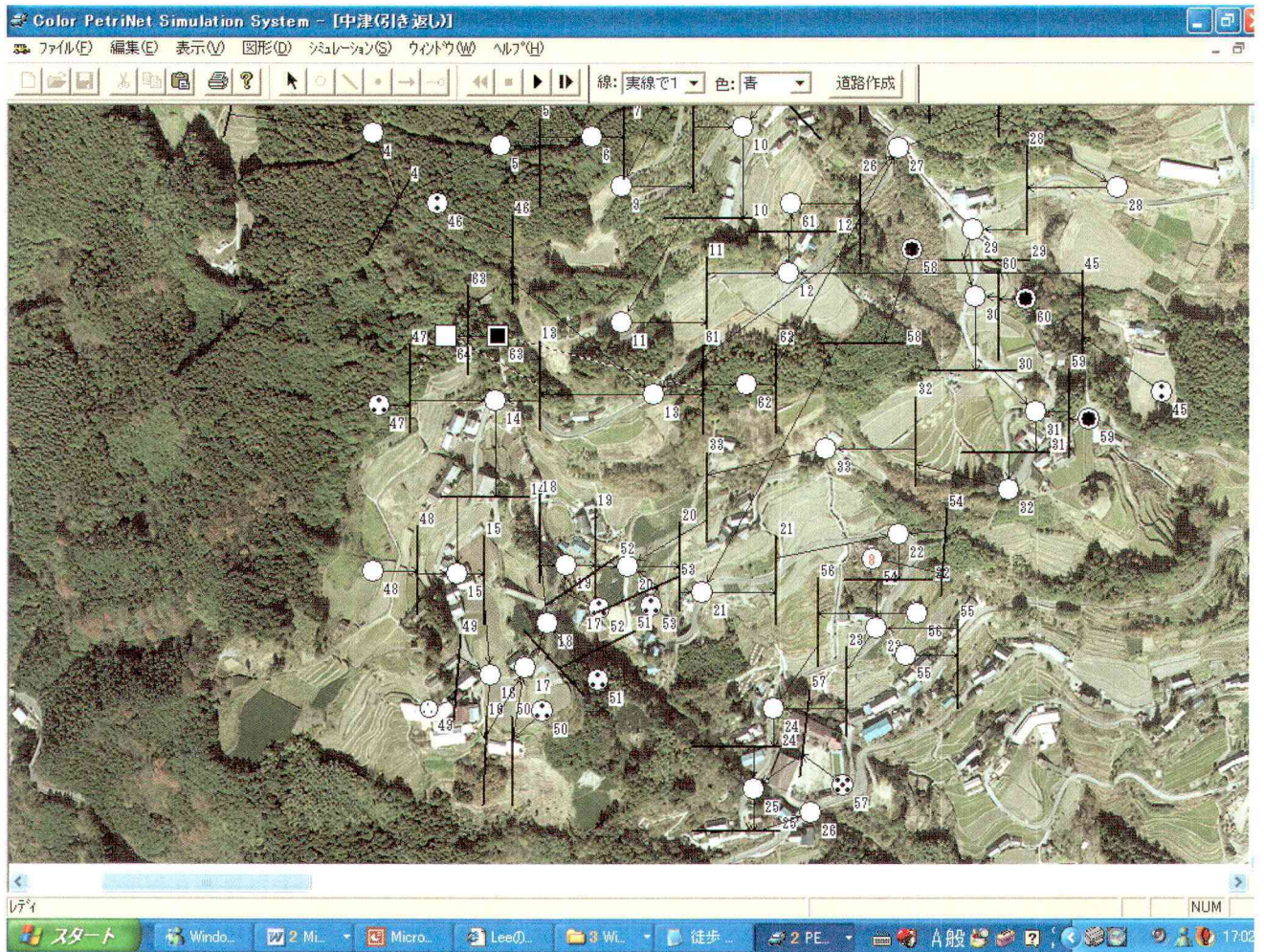


図-18 背景画像上の車移動経路ネットワークの構成

無い場合で、必然的に避難者の行動は異なる。前者では、経路2が通行不可能の情報を得ているため、避難者は、経路1を選択するであろう。一方、後者の情報を得てない避難者は、経路2の×印の箇所まで移動し、引き返し行動を行い、経路1を選択することになる。

以上述べたように、阻害事象のシナリオによって、切断、阻害、移動手段の変更と、事象の連鎖が異なり、経路の選択確率に影響を与えると同時に、それらの行動は、情報の有無にも大きく規定されることが理解できよう。図-16は、対象地域のハザードマップ¹³⁾(急傾斜地崩壊危険箇所)を、緑色で示している。図-17は、2004年の台風災害で土砂崩れが発生し経路を阻害している道路である(車は通過できないが、徒歩による通行可能)。避難阻害を与える災害シナリオは、図-16のハザードマップや、図-17の実災害画像、現地周辺画像を参照することにより、避難阻害の要因を明らかにする点で、シナリオにリアリティを与える意味で重要な情報となる。そして、シナリオシミュレーション結果を考察することにより、中山間地域の避難に関する諸問題が明らかになる。



図-19 西村橋の周辺画像

(3) シミュレーションの構成と実行

図-18は、対象とする久万高原町柳谷中津地区を現している。図面下右側に見えるのが避難場所となる小学校を現している。この図では、避難が発生する各世帯と、道路への移動点ならびに交差点にプレースを置き、車・徒歩の移動速度のプレースタイムをプローブ情報から与え、地形による徒歩速度を、4. (1) で説明

した、経路勾配情報を基にネットを精緻化し、徒歩速度推定式(1)、(2)を用いて推定歩行時間をプレースタイマに与えている。

避難シナリオは、全員が一斉に避難を開始し、小学校へ向かうと仮定している。このとき、個々の住民は最短経路を経て小学校へ避難を行うと仮定している。一方、移動手段は、全員が車で避難、あるいは徒歩で避難といった2ケースを想定した。ここで、家族が徒歩避難する場合、最も速度の遅い属性の移動速度で全員が移動すると仮定した。

移動障害シナリオとして、図中央左上のスペース(■)は、土砂危険溪流¹⁴⁾に架かる橋梁であり、地震時には橋脚被害による通行できない危険性がある。そこで、このスペースが切断された場合のシナリオを追加想定する。このとき、避難者は、西村橋手前で引き返すと仮定する。西村橋の周辺画像を、図-19に示す。シナリオ別の各世帯の避難所までの完了時間は、(徒歩、障害なし)=32分05秒、(徒歩、障害あり)=40分10秒、(車、障害なし)=11分12秒、(車、障害あり)=13分40秒となった。これらの結果より、西村橋通行障害による影響が、徒歩の場合約8分、車の場合、約3分生じることが分かる。

5. おわりに

本稿では、中山間地域の避難計画に着目し、著者らが適用を行っている背景画像上でペトリネットシミュレーションを活用することを試みた。はじめに、ペトリネットの結合化を特徴とする、事象の部分ネットの基本構造を明記し、中山間地域の避難計画を考える場合、避難開始、移動、合流、分岐、障害、引き返しといった部分ネットの構築が基本となることを明示した。そして、これらの部分ネットを重層的に結合することによって、現象の拡大・精緻化が図れることを示した。つぎに、中山間地域の避難計画を考える上で、都市部と違い地形制約や障害要因が、移動手段別速度に影響を与えることを示唆し、これらの問題を解決する手段として、プローブ情報技術の活用が期待できることを示した。そして、ペトリネットを逐次的に構成する方法と連携化したプローブデータの収集法を提案し、プローブ情報の地図化システムを活用することにより、ペトリネットの必要情報である、移動手段別移動速度を直接、あるいは間接的に付与できることを明らかにした。

最後に、限られたシナリオ下ではあるが、実行事例を通してシミュレーションの基本実行と有効性を確認することができた。しかし、本研究は、緒についたばかりであり課題が山積している。例えば、中山間地域の避難計画を考える場合、避難情報の伝達、相互扶助型避難の提案、現実性を担保した災害シナリオの設定を具体的に計画可能とする情報収集が必要となろう。そのためには、情報伝達と避難者の行動についての知見の整理も必要となる。また、今後、地盤災害のメカニズムの部分ネット化、ハザードマップと周辺画像か

らの障害シナリオ想定、移動手段・選択確率を考慮したシミュレーションの実行と評価・課題の抽出も必要であろう。さらに、プローブデータの活用と整理法について、ペトリネットの部分ネットとの連携を意識しながら、支援システムの改良とともに、研究を展開したいと考えている。

謝辞: 研究を進める上で、貴重な背景画像である、柳谷地域の航空写真の提供を頂いた、愛媛県久万高原町柳谷支所建設課山本係長と同建設課職員、ならびに、土砂災害に関する詳細ハザード情報の提供を頂いた愛媛県土木部砂防課の皆様にご心より感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 木俣昇、鷲見育男: 消防防災システムの障害要因のペトリネットシミュレーションに関する基礎的研究、土木計画学・論文集、No. 14, pp. 393-400, 1997年9月。
- 2) 木俣昇、松井竜太郎: 背景画像上でのバス交通計画のペトリネットシミュレーション技術、土木情報利用技術論文集、Vol. 12, pp. 207-216, 2003年10月。
- 3) 木俣昇、中村彰彦: 交通流ペトリネットシミュレータにおける背景画像上でのデータベース化に関する研究、土木計画学・論文集、Vol. 21 no. 1, pp. 51-62, 2004年9月。
- 4) 堀浩三、木俣昇: 背景画像上での地震時緊急車両走行のペトリネットシミュレーション開発、土木計画学研究・講演集、Vol. 30, CD-ROM, 2004年11月。
- 5) ペトリネットによる背景画像上での建物内避難シナリオのシミュレーション研究、土木計画学研究・講演集、Vol. 30, CD-ROM, 2004年11月。
- 6) 上埜一樹、堀浩三、木俣昇: ペトリネットシミュレータによる背景画像上での救急車両の走行性考察、土木学会中部支部研究発表会講演概要集、IV-61, pp. 419-420, 2005年3月。
- 7) 高野龍一、曾根岳志、木俣昇: ペトリネットによる背景画像上での地震時避難シナリオのシミュレーション法、土木学会中部支部研究発表会講演概要集、IV-60, pp. 419-420, 2005年3月。
- 8) 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ションの開発、土木計画学研究・講演集、Vol. 30, CD-ROM, 2004年11月。
- 9) 久万高原町柳谷中津地区航空写真: 愛媛県久万高原町柳谷支所建設課提供、2002。
- 10) 二神透、木俣昇: 中山間地域の救急・避難計画支援のための情報システム開発、土木情報利用技術講演集、Vol. 29, pp. 29-32, 2004年10月。
- 11) 二神透、柏谷増男、中川周郎、三谷卓摩: プローブビークルを用いた中山間地域の道路ネットワーク作成に関する研究、土木計画学研究・講演集、Vol. 28, 2003年11月。
- 12) 日本火災学会編: 火災便覧、共立出版、1997。
- 13) 久万高原町柳谷中津地区土砂災害危険マップ: 愛媛県土木部砂防課提供、2004。
- 14) 愛媛県土木部土砂災害危険所マップ、<http://www.pref.ehime.jp/070doboku/070sabo/00005743041124/dmap/PDF-HIGH/071H.pdf>

(2005.5.20 受付)