

論文

津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用

今村 文彦*・鈴木 介**・谷口 将彦***

Development of a Simulation Method for the Evacuation from the Tsunami and Its Application to Aonae, Okushiri Is., Hokkaido

Fumihiko IMAMURA*, Tasuku SUZUKI**
and Masahiko TANIGUCHI***

Abstract

A well-designed system for evacuations after warning issues is essentially necessary to reduce human loss. A lack of tools to evaluate an evacuation system lets such problem remain for long time. The objective of the present study is to develop the evacuation model simulating the behavior of human and vehicle by using the network model in the case of a tsunami attack. One of important functions in the model is to include route self-selecting/alternative model at several crossings by interacting and compiling human behaviors and tsunami impact, road condition, and people recognition of geometry. And walking and vehicle speed with function of density and condition on a road can be also included into a model. The validity of the model is examined in the case of the 1993 Hokkaido nansei-oki tsunami at the Aonae area, Okushiri, Hokkaido. The number of survivors and casualties estimated by the model shows good agreement with the reported and the main routes for evacuation to the hill simulated by the model are same as those by the eyewitness accounts.

キーワード：1993年北海道南西沖地震津波，避難シミュレーション，ネットワークモデル

Key words：1993 Hokkaido Southwestern Earthquake Tsunami, evacuation simulation, network model

* 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター
Disaster Control Research Center, Graduate School of
Engineering, Tohoku University

** 東北大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Tohoku University

*** 富山県土木部
Public Works Division, Toyama Prefectural Office

本論文に対する討論は平成14年2月末日までに受け付ける。

1. はじめに

平成5年(1993年)7月12日午後10時17分頃、北海道南西沖を震源として発生したM7.8の地震およびそれに伴って発生した津波により、北海道奥尻島において、死者172名、行方不明者27名、重軽傷者143名にも及ぶ甚大な被害が生じた。特に、島南端に位置する青苗地区においては、死者・行方不明者あわせて、105名という多大な人的被害が生じた。地震発生後、気象庁は5分以内に津波警報を発令したが、その時すでに、津波第一波は奥尻島を襲っていたと言われている。それでも奥尻島では日本海中部地震(1983)の際にも津波被害の経験があり、多くの住民は、地震発生後に自主避難を行っており被害規模に対して犠牲者が少なかったことが指摘されている。

このような大災害時において、人的被害を最小限に押さえるためには迅速かつ確かな避難行動が重要な役割を担うが、適切な避難行動を行うためには、避難に関する正しい情報提供、住民への早期避難等の啓蒙、さらに適切な避難所・経路の確保が重要であることは十分認識されている。

このような避難対策の中でも重要となるのは、住民の避難行動特性に応じた避難誘導計画の策定であるが、災害(特に津波)時における住民の避難行動は複雑かつ広域に及ぶため、その事象を実験やアンケート結果などの手法によってのみ把握するのは困難である。そこで本研究では、津波時の住民の避難行動を再現しうる数値シミュレーション法を開発し、北海道奥尻島青苗地区に適用する。その妥当性を検証した上で様々なケースに応じた避難行動を検討する際の課題の整理を行う。

2. 避難シミュレーションモデルの概要

2.1 既存の避難シミュレーションモデルの分類

これまで、様々な対象領域や目的を持った避難シミュレーションモデルが提案されてきた。既存の避難シミュレーションモデルは、基本項目により、以下のように分類されると考えられる。

(1) 避難群集の表現方法

- i) 流体型…避難路上の群集流を連続流体とみな

し、流体の方程式により群集を表現する(例; 梶ら(1994)のモデル)。

- ii) トランザクション型…個人属性の相違による行動の差を表現するため、避難群集を粒子としてとらえ、それぞれを個々人もしくは、同一属性の集団として扱う(例; 熱海市(1987)のモデル)。

(2) 群集の流動方向

- i) 一方向流型…経路上の群集流を、一街路一方方向とする(例; 清野ら(1994)のモデル)。
- ii) 二方向流型…街路上の群集流を二方向流で取り扱い相互の影響を考慮する(例; 八木ら(1995)のモデル)。

(3) 対象地区の扱い

- i) ブロック型…実際の市街地パターン、街路パターンをそのまま利用する(例; 横山ら(1993)のモデル)。
- ii) メッシュ型…実際の市街地の街路パターンをメッシュで表現する方式。多くの場合、正方形メッシュが用いられる(例; 熱海市(1987)のモデル)。
- iii) ネットワーク型…実際の市街地の街路パターンをノードとリンクからなるネットワークで表現する方式(例; 梶ら(1993)のモデル)。

(4) 経路選択

- i) 外生型…出発地から避難地までの経路をあらかじめ入力情報(与条件)として与える方式(例; 清野ら(1994)のモデル)。
- ii) 内生型…モデル内でその場の条件・避難者の知識・認識などにより順次経路を選択させる方式(例; 瀧本ら(1995)、高棹ら(1995)、Ebihara et al.(1992)のモデル)。

2.2 避難シミュレーションモデルの開発方針

実際に津波来襲時の避難行動を詳細に検討した例は極めて少なく、その実態は不明であった。しかし、北海道南西沖地震津波の奥尻島青苗地区において、初めて詳細な調査が行われ、実態が報告されている(東京都立大学, 1994)。本研究では、その結果を十分考慮し、避難シミュレーションモデルの開発のためには以下のような項目が必要で

あると判断できた。

まず、比較的広域な範囲を対象とでき、地下街のような群集より個人単位での住民避難行動を表現できる必要がある。また、海水浴場や市街地などを対象とした場合、避難できる経路は限定されており、それらをリンクで表現する必要がある。これにより、人だけでなく車などの異なった移動手段を取り入れることができる。そこで、以下の点に留意したモデルを作成する。

- i) 街区を、構成するネットワーク（街路状況）により表現できること。
- ii) 道路情報、交差点情報、人口データ等の初期条件を設定できること。
- iii) ある程度広域な地域を対象とできること。
- iv) 時々刻々に情報を入出力できること。
- v) 人間の判断を導入し、交差点における適切な経路選択が可能であること。
- vi) 経路上での状況に対応させた避難速度を設定できること。

2.3 避難シミュレーションモデルの構成

前節で述べた方針に基づき、本モデルにおける基本項目を以下のように決定した。

- (1) 避難群集の表現…トランザクション型（方針 v）
- (2) 群集の流動方向…二方向流型（方針 i, ii, vi）
- (3) 対象地区の扱い…ネットワーク型（方針 i）
- (4) 経路選択…内生型（方針 v）

また、本研究において開発した避難シミュレーションモデルは、Fig. 1 の避難シミュレーションの概略フローに示すように、

- ・入力情報としての人間情報、道路情報、制御変数
- ・処理ルーチンとしての避難行動の追跡ルーチン
- ・出力情報としての避難状況、道路上の人口密度、および要避難時間

により構成されている。

3. 避難行動の決定モデル

3.1 概要

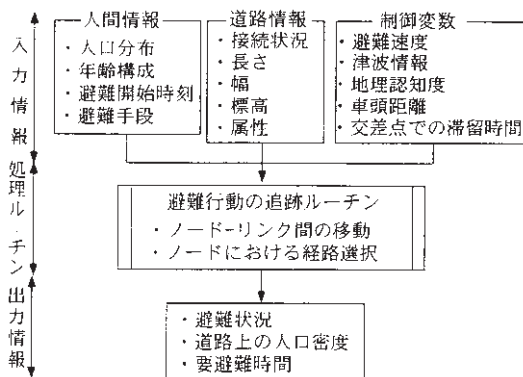


Fig. 1 Flowchart of the evacuation model. The model is composed of input, treatment routine in the network model, output information.

津波時には①避難の早期開始、②的確な経路判断および③迅速な避難速度が必要とされる。したがって、シミュレーションモデルを開発する際には、経路選択における人間の判断と状況に応じた避難移動速度を組み込む必要がある。本研究では、シミュレーションで重要な位置をしめる避難行動のモデル化について検討する。

前章でも述べたように本モデルでは、対象地区の表現方法としてネットワーク法を用いており、ネットワーク法においては、街路をFig. 2 に示すようなノードと、リンクで表現する。特に本研究においては、ノードとリンクに以下の情報を持たせる。

- ・ノード…属性（安全地帯かどうか）、道路の接続状況、標高
- ・リンク…リンクの両端のノード、長さ、幅

避難者はこのネットワーク上を移動する。その際に、上に述べた情報および、密度や津波危険性といった経路上での状況に基づいて避難経路の判断をする。また、これらの情報および経路上の状況に基づき避難速度も決定される。

3.2 避難行動の概要と避難の開始

避難者は前節で示した街路ネットワーク上を移動することによってFig. 3 に示すように避難を進める。初期条件としては、避難者は自宅に最も近

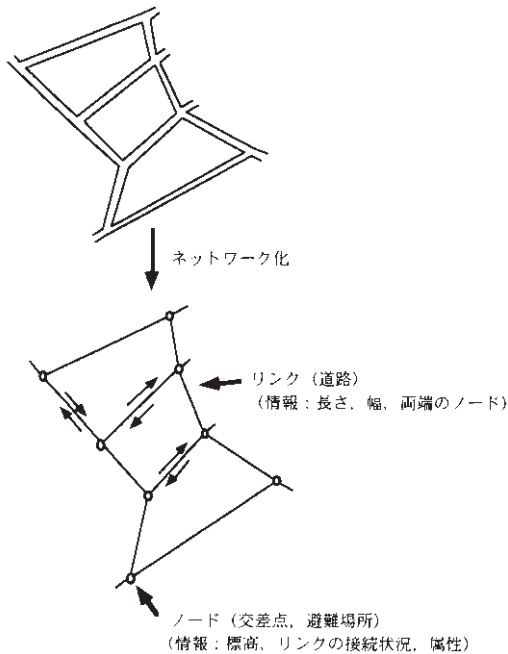


Fig. 2 Network model in which the street is indicated by nodes and links. Information of land level, length, width and etc. on nodes and links are given for evacuation.

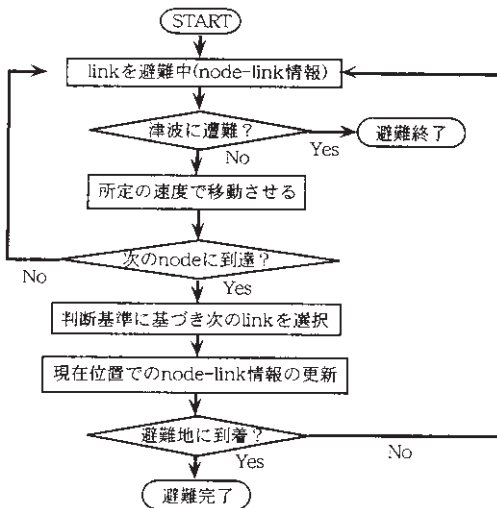


Fig. 3 Flowchart showing the evacuation behavior on the network model. A person can be on links as an initial condition. Starting time of evacuation is given for each people. Evacuation should be completed when a person arrives at a safety area.

いリンク上にいるものとする。北海道南西沖地震津波は、深夜 10 時 17 分に発生したため、ほとんどの住民は自宅にいた。シミュレーションの時間原点は地震津波の発生時とする。次に、各避難者にそれぞれ避難開始時刻を設定する必要があるが、この避難開始時刻の設定が一般的に非常に難しく、青苗地区においても正確には分かっていない。ただし、生存者の一部へのアンケート結果（東京大学，1994）により Table 1 のような結果は得られているので、本シミュレーションではこれを元に仮定している。このような情報がない状況で設定する場合には、津波の経験，知識，情報の有無などで設定する必要がある。これに関しては今後の検討課題となるが、永川・今村（2000）の研究のように、過去の事例を整理し、避難行動開始に関するカテゴリーを数量化分析で解析し、推定する方法考えられる。

住民の避難開始時間は自宅から道路へ出た時点とする。避難開始後には最寄りのノードをめざし、ノードにたどり着いた避難者は、各人の判断基準に基づいて次に進むべきリンクを選択する。判断基準については次節で述べる。さらに選択したリンク上を避難していき、ノードにたどり着いたら同様に次に進むべきリンクを選択する。このような一連の避難行動を繰り返し、避難地に到着したところで避難完了とする。津波避難の場合、一斉に行動する場合が多く、道路上にはかなりの人数・車の台数があり、時々刻々と津波の来襲状況が変化するので、このような内生型モデルが必要である。

3.3 経路の選択方法

経路選択は、住民の避難行動特性に基づいて行わなければならない、その場所と状況により経路を選択できる内生型の方法が必要である。本研究では、以下の項目を判断基準に取り入れ、それぞれの判断基準に基づいて経路選択を行うものとする。

選択は、以下の項目の順番を優先順位として実施していく。下線部分は特に本研究で青苗地区を対象とする場合の条件設定（政策変数）である。

(1) リンクの使用可能性

Table 1 Starting time of evacuation and its percentage of all people, which are estimated by interviews to the people in Aonae by Univ. Tokyo (1994).

3, 4区				5区			
避難開始時刻		避難者に対する割合		避難開始時刻		避難者に対する割合	
徒歩	車	調査結果	再現モデル	徒歩	車	調査結果	再現モデル
0.5min	1.5min	23%	23%	0.5min	1.5min	23%	17%
3min	4min	23%	23%	1.5min	2.5min	23%	17%
4min	5min	36%	36%	2min	3min	36%	27%
5min	6min	18%	18%	2.5min	3.5min	18%	13%
				3.5min	4min		26%

津波来襲後は、浸水地域に当たるリンクは通行不可能とする。また車で避難する場合は、平均的な自家用車の幅寸法と少しの余裕を考慮して、通過するために必要なリンクの幅を 2.5 m とし、それ以下の場合は通行不可と仮定した。

(2) リンクの接続状況

本モデルにおいては対象標本は全て地元住民であることから、地理認知度を 100 % とし、行き止まりとなっているリンクは選択しないものとする。一般的に、地理認知度の設定に当たっては、現地住民か訪問者であるかを区別し、その情報をシミュレーションの初期データとして入力する必要がある。現地住民にとって、行き止まりなどへの選択は除外し、かつ避難所の位置情報を入れる必要がある。一方、訪問者は、ほぼ完全な内生型の経路選択基準になるとされる。汎用的な地理認知度の設定に関しては、調査研究が少なくさらに検討が必要である (鈴木ら, 1999)。

(3) 標高

ここでは津波からの避難ということで、標高のより高いノードをめざすものとする。

(4) 交通密度

1つのリンク上での住民と車を考える。交通密度はリンク上の標本 (住民と車) の占有面積/道路の面積で求めるものとする。また、道路上の標本の占有面積は、車の場合は $10 \text{ m}^2/\text{台}$ 、人では $1 \text{ m}^2/\text{名}$ と仮定した。車の専有面積は、標準的な自家用車を対象とし、人に対しては歩行できる余裕のある間隔を考慮している (岡田ら, 1977)。この交通密度は歩行速度や自動車速度など避難速度に

大きく影響する。避難速度が半分以下に低下するほど交通密度が高い場合は、そのリンクを避けて、次にふさわしいと思われるリンクを避難するものと仮定する。ただし、交通密度が高いリンクを避けることによって、交通流に逆流するように避難してしまう場合は変更しないとした。

3.4 避難速度の推定

(1) 避難速度の式

徒歩、車のいずれの移動手段であっても、道路上の様々な要素の影響を受けて、移動速度は変化するはずである。現実 に即した避難シミュレーションのためには、避難速度の設定は最も重要な項目の一つである。

本研究では、避難速度は道路上の群集や車の密度、道路勾配の二つの要素の影響を受けるとし、避難速度 V を以下のように設定した。

$$V = C \times S_k \times S_j \quad (1)$$

ここで、 C ; 標本の最高速度 (m/s), S_k ; 交通密度 k による減速度, S_j ; 縦断勾配 j による減速度とする。

(2) 最高速度

今回は、道路幅の狭い市街を対象とするために、車の最高速度を $C = 8.3 \text{ m/s}$ ($= 30 \text{ km/h}$) とし、徒歩の場合は白澤ら (1997) の結果および文部省体育局 (1994) の体力・運動能力調査報告を用いて年齢により変化させた。青苗地区では、避難時に住民は全速で走って移動したという報告はなく、徒歩によると報告されている (都立大, 1994; 東大, 1994), 当時の避難時間と距離とにより、推

算すると歩行速度は $C = 0.8 \sim 1.8 \text{ m/s}$ ($= 2.9 \sim 6.5 \text{ km/h}$) となった。

(3) 交通密度による減速

交通密度 k による減速度 S_k は、車の場合と徒歩の場合に分けて、それぞれ式 (2)、式 (3) で仮定する。

$$S_k = \frac{1}{2} \left\{ -\tanh \left(\frac{2 \times (k - 0.20)}{0.20} \right) + 1 \right\} \text{ (車)} \quad (2)$$

$$S_k = 1 - 0.64k \quad \text{(徒歩)} \quad (3)$$

ここで、 k は交通密度である。上式はそれぞれ、首都高速道路における観測結果 (交通工学研究会, 1973)、および二方向流を想定した歩行速度式 (消防科学総合センター, 1983) を基に仮定して設定している。

(2) 式の仮定方法は以下のとおりである。首都高速道路での観測結果によると、線形の影響で自由速度が抑えられる場合には、交通密度と平均速度の関係を表す k - v 相関は、ベルカーブに近い (4) 式で近似されうる形態をとる。

$$\bar{v} = \frac{v_f}{2} \left\{ -\tanh \left(\frac{2(k - C_0)}{C_0} \right) + 1 \right\} \quad (4)$$

この式において、飽和密度 $k_j = 2 C_0$ である。 V_f は最高速度である。観測から得られた飽和密度 $k_j = 120 \sim 150 \text{ 台/km/車線}$ 程度である。これを 1 車線 $= 3.5 \text{ m}$ 、道路上の車の占有面積 $= 10 \text{ m}^2/\text{台}$ として換算すると、 $k_j = 0.34 \sim 0.43$ となる。そこで、 $k_j = 2$ 、 $C_0 = 0.40$ として計算すると $C_0 = 0.20$ となり、これを (4) 式に代入すると、(2) 式となる。

また、(3) 式は (5) 式の歩行速度式を基に仮定した (臼澤ら, 1997)。

$$V = 1.724 - 0.313 \rho \quad (5)$$

ただし、 V ; 歩行速度 (m/sec)、 ρ ; 道路上の人口密度 (人/m^2)

(5) 式を最大速度によって正規化すると、(6) 式となる。

$$V/1.724 = 1 - 0.182 \rho \quad (6)$$

歩行速度式では、飽和密度を $3.5 \text{ (人/m}^2)$ としているが、本研究では、道路上の人が占める面積を $1 \text{ (m}^2/\text{人)}$ としているため、飽和密度は 1 となるので、交通密度は $k = \rho/3.5$ となる。これを

(6) 式に代入すると、(3) 式が得られる。

(4) 縦断勾配による減速

徒歩の場合は縦断勾配 j による減速度 S_j に関する研究や測定は極めて少ない。本研究では、臼澤ら (1997) が行った現地測定による観測結果を基に以下のように仮定した。

$$S_j = \frac{1}{2} \left\{ -\tanh \left(\frac{2 \times (j - 0.24)}{0.24} \right) + 1 \right\} \quad (7)$$

車の場合は縦断勾配の速度への影響は比較的小さいものと思われるが、今後の検討は必要である。なお対象としている青苗地区には、車両が通過できる道路で勾配が 10% 以上の道路はなく、勾配による影響は非常に少ない。(7) 式において、勾配が 10% 以下の場合には、勾配による減速度は約 0.9 であるので、車の場合にも (7) 式を適用して差し障りないと思われる。

3.5 車頭間隔の設定

本研究においてモデル開発の際に車頭距離をある程度確保しないと、車が重なり合って交通密度が大幅に増加し、異常な渋滞の表現の原因となることがわかった。そこで、以下のように車頭間隔を仮定して確保した。

(1) 道路が 2 車線以上あり、対向車が来ていない場合は、2 m

(2) 道路が 1 車線、もしくは対向車が来ている場合は、4 m

また、車頭間隔を確保することにより、ノードにおける滞留も以下のように表現することができる。あるノード上に車がいる場合、そのノードを目標ノードとしている避難者は、その車を追いついて、次のリンクを選択できないものとする (Fig. 4)。これは、先行する車の動きを無視して経路の選択をすることは少ないとの日常の判断による。これにより、合流交差点などにおける、ノードから発生する滞留なども表現することができる。

4. 青苗地区での再現モデル

4.1 シミュレーション対象

北海道南西沖地震時において最も津波被害の大きかったのは青苗地区であり、特に青苗 5 区の被

害は顕著であった。そこで本研究では、青苗5区と、その周辺地区の3、4区を対象地区とした。対象地区をFig. 5に示す。

次に、本研究の避難シミュレーションの再現性を検証する手段として、地震津波直後の、東京都立大学(1994)及び東京大学(1994)による避難行動の詳細な調査結果を基に、この地震津波の際

に実際に避難行動を取った住民を対象として、その避難行動を追跡した。避難手段としては徒歩と車があり、車の台数は、アンケート結果から得られた最低限の台数で設定している。

青苗5区では地震5分後、3、4区では17分後には津波が来襲しており、シミュレーションにおいて、それぞれの時間においてその地区にいる避難者は避難できなかったものと判断する。なお、最終避難場所として図中の斜線部で示された青苗3区、4区の西方にある高台を設定した。また、矢印は津波の来襲方向を示す。

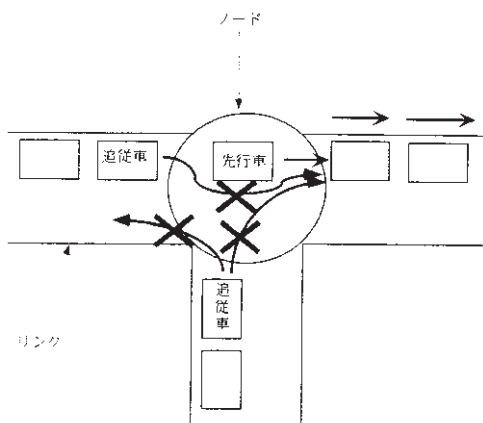


Fig. 4 Stagnation of vehicles on a node. When a car is in a node, the car aiming at the node can't pass the preceding car and choose the next link.

4.2 避難開始時刻の設定

一般的に避難開始時刻については、個々に対して正確なデータは得ることは難しい。今回も対象者全員の時刻を推定することは出来なかった。そこで、以下のように、アンケート等での情報をもとに避難開始時刻の推定を試みた。

東京大学(1994)のアンケート結果によると、23%の人が、「まだ揺れがおさまらないうちに避難を開始した」とある。また避難の決断をしたきっかけとしては主に、

- 1) 日本海中部沖地震津波の経験から、また津波がくると思ったから。

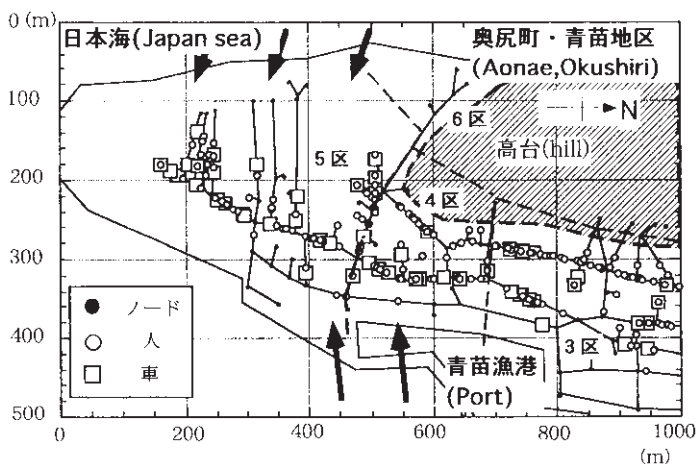


Fig. 5 Object domain for the evacuation at Aonae, Okushiri, Hokkaido. Initial condition of the people and vehicles is given. Arrows show the attack direction of the tsunami five minutes at Aonae 5, and seventeen min. at Aonae 3 and 4 after the earthquake.

2) 家族が避難しようと言ったから。
 3) 親戚や近所の人が避難するように言ったから。
 の3つの理由があげられる。これらを理由としてあげた人の割合はそれぞれ、1) 46%, 2) 36%, 3) 18%であった。1) から3) になるにつれて避難開始時刻が遅れることを考慮して、避難開始時刻及びその割合を Table 1 のように設定した。5区では、地震5分後に津波が襲来しているため、アンケート結果によると避難行動した住民は地震後5分以内に避難開始している。しかしながら、3, 4区では津波の来襲時間が遅れ、地震5分後以降に避難開始した例も報告されている。また、日本海中地震津波の被災は岬の先端である5区で生じており、当時の記憶を残している住民が多い。従って、3, 4区の避難開始時刻は5区よりも遅く設定した。また、車で移動する際には、車に乗り込むための時間がかかるため、徒歩で移動する場合よりも1分遅らせた。この1分という時間は、家族を集める時間と駐車場までの移動時間を考慮して仮定した。

また、避難遅れが基で被災した人の避難遅れの理由としては、

- i) 体が不自由で早く避難できなかった。
- ii) 家族と一緒に避難しようとして避難が遅れた。
- iii) 車に荷物を積んだり、近くに駐車させてある

車を取りにいったりした。

iv) 近所に津波の注意を呼びかけたり、一緒に避難しようと言えにいったりした。

などが考えられている。従って、これらの人は避難開始が遅れたため遭難したとして、遭難した避難者(5区の住民の26%)の避難開始時刻は、無事だった人の避難開始時刻よりも遅らせて、徒歩の場合は地震3.5分後、車の場合は地震4分後に設定した。

以上のように設定したモデルを再現モデルとする。なお、地震の発生時間が午後10時17分であることから、地震前(避難開始時)での住民の位置は各人の自宅とし、Fig. 5のように設定している。

4.3 再現モデルの結果

シミュレーションの結果の例として、シミュレーション開始3, 5, 7分後の避難状況をそれぞれ Fig. 6 a~c に示す。図からわかるように、避難開始後、それほど時間が経過して時点では、標本は主に2つのルート(Fig. 6 a に示す)を經由して避難していることが分かる。さらに地震後5分前後になると、ほぼ一つの経路を通して避難地に移動していることがわかった。これらの避難経路は、東京都立大学(1994)のアンケートから得られた、実際に避難者が選択した経路結果と一致する。

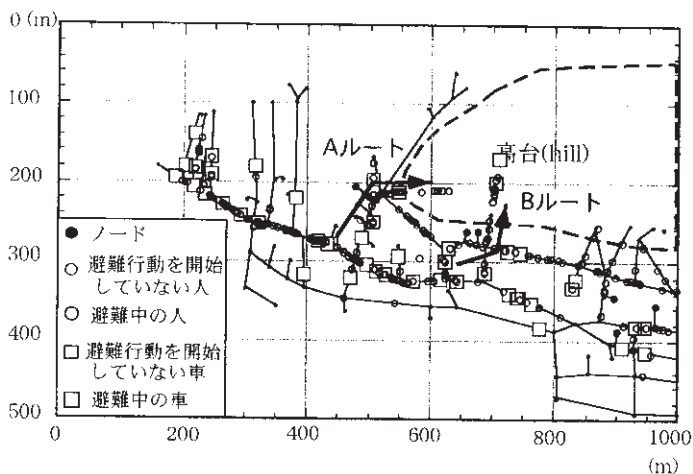


Fig. 6 a Computed result of evacuation three minutes after the earthquake. Most of the people started to move for the hill passing through A and B routes mainly.

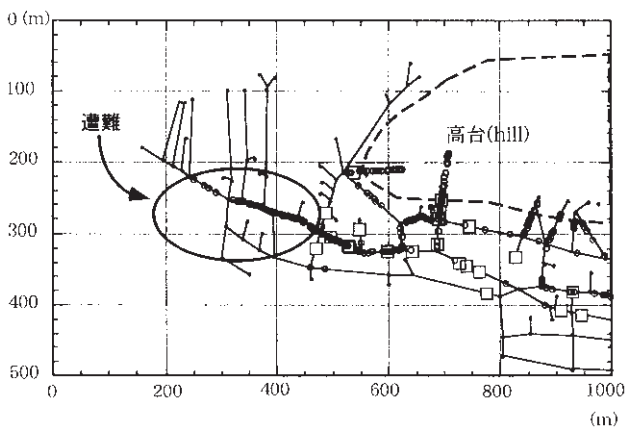


Fig. 6 b Computed result of evacuation five minutes after the earthquake. The tsunami attacked at Aonae 5 minutes after the earthquake.

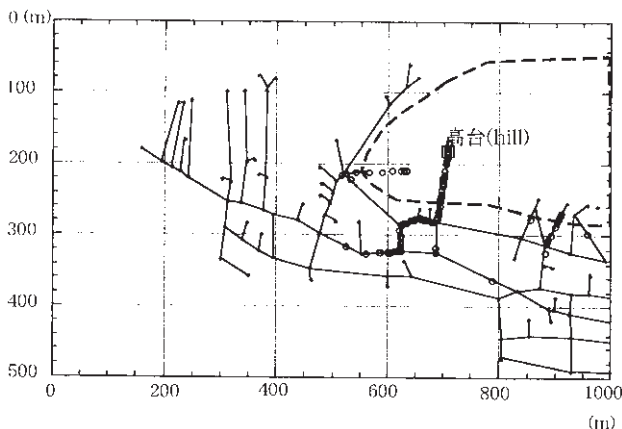


Fig. 6 c Computed result of evacuation seven minutes after the earthquake. The people move to the safety area mainly through A and B routes before five min. and B route after five min.

また、調査とシミュレーション(再現モデル)による要避難時間を Table 2 に、避難率および遭難車両数を Table 3 に比較する。ただし、避難開始時刻は割合を基準にしランダムに設定しているため、結果は、5回以上のシミュレーションを行った結果の平均値で算出した。再現モデルにおいて、避難率および要避難時間が良い相関を示したことは、本モデルの妥当性を示している。

しかしながら、5区から出発した多くの標本が地震5分後以降に選択している経路は、高台までの最短距離(Aルート)ではなく、標本は遠回りをして高台へ移動していることになる(Bルート)。

シミュレーションにおいては、幅が広く、かつBルートへの道路の標高が高いために、5区の住民がこのルートを選択した結果となった。この妥当性は検証できないが、Aルートを通じた住民も確実にいたことが分かっており、地理認知度の導入について更なる改良が必要となることを示している。

5. 避難手段に注目した仮想シミュレーション

5.1 移動方法について

これまでも述べたとおり、津波時には迅速な避

Table 2 Comparison of evacuation rate at each time between interviewed and computed.

	0~1min	1~3min	3~5min	5~10min	10~15min
アンケート	8.1%	38.3%	36.0%	6.9%	10.7%
再現モデル	9.6%	47.4%	26.6%	15.9%	0.5%
モデル①	23.8%	55.1%	14.1%	6.9%	0.0%

Table 3 Comparison of evacuation rate at Aonae 3, 4 and 5 for each model with different conditions.

	避難率			避難車両数 (平均)
	3区	4区	5区	
調査結果	100%	100%	74.2%	3
再現モデル	100%	100%	74.5%	0
モデル①	100%	100%	93.5%	0
モデル②	100%	100%	91.0%	0
モデル③	100%	100%	98.7%	0.3
モデル④	100%	100%	74.4%	0.3
モデル⑤	100%	100%	88.6%	1.7
モデル⑥	100%	100%	85.2%	11

(車1台を人3名に換算)

難が重要である。東京大学(1994)のアンケート結果によると、「避難途中で遭難した人の多くは、徒歩でゆっくり避難していた」とある。実際、NHKが撮影したVTRのなかには、徒歩で移動している住民が写し出されている。もし、全ての人が全速力で走って避難していたら、より犠牲者が少なくなることも予想される。このように移動速度は重要な要素となる。

車で避難する場合には、移動速度は大きくなるが、いったん渋滞がおきてしまうと大量の人命が失われることも予想される。また、車を発進するにはある程度の時間が必要であり、避難開始時刻は遅れる。車は利用方法、道路状況によっては有効であるが、その利用は制限が必要となるはずである。本章では、このモデルを用いて、仮想的に当時の様々の条件が違った場合に、どのような避難形態になるかを調べるために、避難手段に着目したケーススタディを行った。

5.2 再現モデルの設定変更

再現モデルにおける設定を以下のように変更し

て、ケーススタディを行った。

モデル①：徒歩で避難する避難者が、全て走って避難するとした場合

(避難速度を再現モデルの2倍にする)

モデル②：車の台数を、再現モデルの2倍にした場合(人3名を車1台に変換)

モデル③：車の台数を、再現モデルの3倍にした場合(人3名を車1台に変換)

モデル④：再現モデルにおいて、車が地震3.5分後に一斉避難した場合

モデル⑤：モデル②において、車が地震3.5分後に一斉避難した場合

モデル⑥：モデル③において、車が地震3.5分後に一斉避難した場合

5.3 仮想シミュレーションの結果

モデル①についての、再現モデルとの要避難時間の比較をTable 2に示す。またすべてのモデルについての、再現モデルとの避難率の比較をTable 3に示す。

モデル①の結果より、やはり徒歩ではなく走っ

て避難した場合、急激に避難率が増加した。また、要避難時間も大幅に短くなった。これにより、迅速な避難行動の重要性が再認識された。

さらに車の台数をモデル②、③のように増加させた場合には、避難率の増加につながっている。この結果より、この地域の道路がかなりの自動車を利用する許容があることを示している。ただしモデル④、⑤、⑥のように車を一斉避難させた場合（最悪の状況を設定）には、車の台数が多くなるほど渋滞が生じ、遭難車両数が増加しモデル②、③に対して避難率が低下する。このケーススタディは、車両による避難の有用性と危険性を具体的に示すことができた。

渋滞が生じた例として、モデル⑥における避難開始地点を Fig. 7 に、地震後 4 分後～6 分後の避難状況を Fig. 8 a～c に示す。

6. 結論

避難シミュレーション法の開発を行い、その検証を北海道奥尻島青苗地区を対象に実施した。判断基準を加えることにより、アンケート結果と同じ避難経路を選択させることができた。また、再現モデルにおいて、避難率と要避難時間が調査の結果と良い相関を示したことから、避難開始時刻および避難速度の設定がほぼ適切であることが検証できた。最後に、ケーススタディにおいて、交

通手段とそれによる避難遅れの影響を調べ、特に車両の滞留の有無が避難時間に大きな影響を与えることが分かった。本モデルの改良点としては、以下の点が考えられる。

1) 地理認知度の導入方法

本モデルでは地理認知度を一律に 100 % とし、標本毎に変化をつけていない。現実には、地理認知度に個人差があるはずであるので、地理認知度の導入方法を改善すべきである。地理認知度は、目標地や安全地帯への最短経路の判断へ導入されるべきであろう。

2) 判断基準の評価方法

本モデルでは、判断基準の各項目に優先順位をつけて経路選択を行っているが、実際の判断は、全ての判断要素の総合評価で行うものである。従って、判断基準の評価方法も、それぞれの項目と、その項目の重要度を考慮に入れて、それらの総合評価で行うべきである。

3) 避難者間の意思伝達

本モデルでは、交通密度以外には標本同士で互いに作用しない。しかし実際には、避難行動の際に避難者同士で意志交換を行うはずである。したがって、標本間に何らかの作用を持たせるべきである。また、状況によっては群集行動の要素も取り入れる必要がある。

4) 対向車とのすれ違い（1 車線道路）

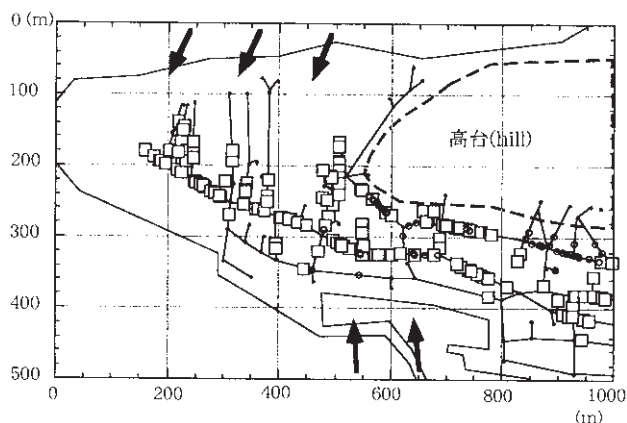


Fig. 7 Starting points of evacuation in model ⑥ (This case that the number of cars increases three times more than the actual situation and cars start to move at the same time three and a half minutes after the earthquake).

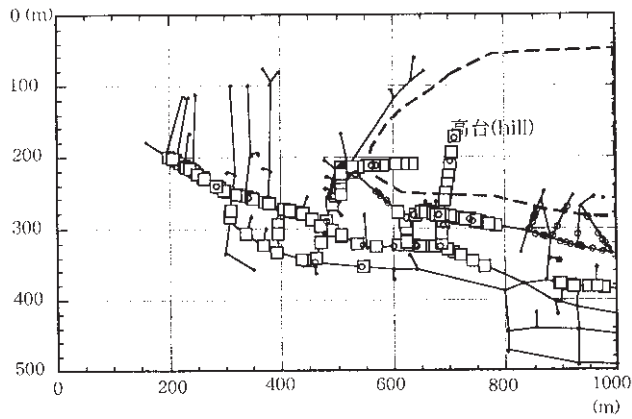


Fig. 8 a Computed result of evacuation four minutes after the earthquake in the case of model ⑥.

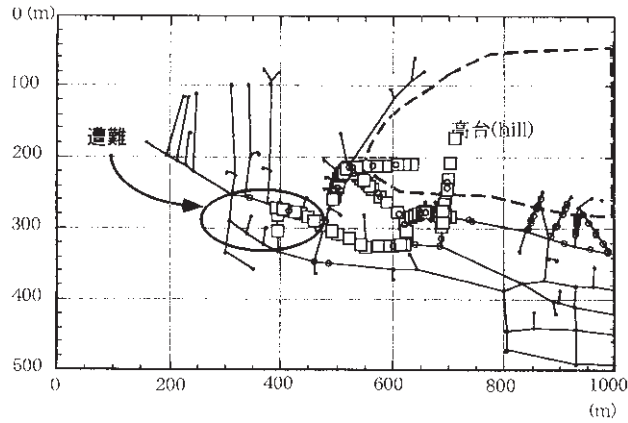


Fig. 8 b Computed result of evacuation five minutes after the earthquake in the case of model ⑥. Stagnation of vehicles takes place at the nodes for A and B routes.

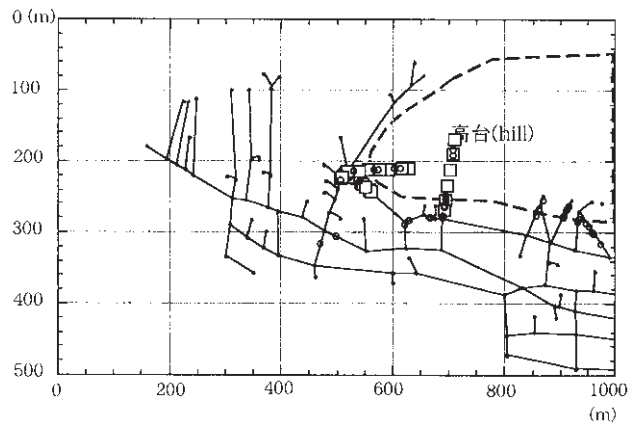


Fig. 8 c Computed result of evacuation six minutes after the earthquake in the case of model ⑥.

本モデルにおいて、一車線道路において車がすれ違う際、交通密度が飽和状態になりそのまま動かなくなってしまう。しかし実際には一方の車が後退などして、道の譲り合いをするはずであり、このような車の挙動もモデルに組み込むべきである。

5) 道路上の障害物の考慮

道路上に駐車車両などがあると、通行が制限され、避難者(特に車)の移動速度が急激に低下し、避難率や要避難時間に大きな影響を及ぼす。特に、地震津波の場合には、地震の影響で道路上に落下物や建築物の残骸が多く存在する。従って、道路上の障害物もモデルに組み込むべきである。

以上の点を改良した上で本モデルを他の地区へ応用していくことが今後の課題として残されている。

謝辞

本研究の一部は科学研究費(基盤(C))(代表今村文彦)により補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 熱海市：観光客等避難対策調査報告書，pp.99-158, 1987.
- 2) 白澤秀明・今村文彦・首藤伸夫：津波時の避難シミュレーション法の開発，平成8年度東北支部技術開発研究発表会講演概要，pp.430-431, 1997.
- 3) 永川賢治・今村文彦：情報伝達・避難開始時間に着目した防災力評価手法の提案，東北大学津波工学研究報告，Vol.7, pp.79-94, 2000.
- 4) Ebihara, M., A. Ohtsuki and H. Iwaki: A model for simulating human behavior during emergency evacuation based on classificatory reasoning and certainty value handling, *Microcomputers in Civil Engineering*, Elsevier, Vol.7, pp.63-71, 1992.
- 5) 岡田光正・吉田勝行・柏原土郎・辻 正矩：建築と都市の人間工学，鹿島出版会，289 p, 1977.
- 6) 梶 秀樹・熊谷良雄・李 戴吉・林 広明・西垣太郎：繁華街の避難安全性評価に関する研究-繁華街避難モデルの構築-，地域安全学会論文報告集，No.3, pp.165-170, 1993.
- 7) 梶 秀樹・中濱伸司：災害時の避難から見た地下鉄駅の危険評価-大手町駅をケーススタディとして-，地域安全学会論文報告集，No.3, pp.153-159, 1994.
- 8) 交通工学研究会：交通管制第二次システムの基本プログラムに関する研究，pp.154-159, 1973.
- 9) 消防科学総合センター：避難シミュレーションシステム研究開発報告書，67 p., 1983.
- 10) 鈴木 介・今村文彦・熊谷 純，視覚情報・地理認知度を考慮した避難行動モデルの開発，土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，IV-73, pp.524-525, 1999.
- 11) 清野純史・三浦房紀・瀧本浩一・中嶋庸一：個別要素法(DEM)を用いた群集行動シミュレーション，地域安全学会論文報告集，No.4, pp.321-327, 1994.
- 12) 高棹琢馬・椎葉充晴・堀 智晴：水害避難行動のミクロモデルシミュレーションと制御に関する研究，土木学会論文集，No.509/II-30, pp.15-25, 1995.
- 13) 瀧本浩一・三浦房紀・柿本正裕：防災要員を考慮に入れた避難行動シミュレーション，地域安全学会論文報告集，No.5, pp.457-464, 1995.
- 14) 東京大学社会情報研究所「災害と情報」研究会：1993年北海道南西沖地震における住民の対応と災害情報の伝達-巨大津波と避難行動-，pp.11-18, 1994.
- 15) 東京都立大学都市研究センター：1993年北海道南西沖地震の総合調査研究報告，pp.54-58, 1994.
- 16) 文部省体育局：体力・運動能力調査報告書，1994
- 17) 八木宏晃・清野純史・三浦房紀：すれ違いや追い越しを考慮に入れたDEMによる人間行動シミュレーション，地域安全学会論文報告集，No.5, pp.449-456, 1995.
- 18) 横山秀史・目黒公郎・片山恒雄：人間行動シミュレーションにおける地下街の安全評価に関する研究，地域安全学会論文報告集，No.3, pp.161-164, 1993.

(投稿受理：平成12年10月10日
訂正稿受理：平成13年1月31日)