

論文

住民意識・行動を考慮した津波
避難シミュレーションモデル

鈴木 介*・今村 文彦**

Simulation model of the evacuation from a tsunami in
consideration of the resident consciousness and behavior

Tasuku SUZUKI*, Fumihiko IMAMURA**

Abstract

The purpose of the present study is to develop and improve the simulation model of tsunami attack evacuation by including the experience, recognition, and knowledge of the people in each area affected by tsunamis. Firstly, we carried out two field surveys to clarify various factors that influence selection of evacuation routes for making a synthetic judgment model. We determined regional knowledge, altitude, road information, road signs, following process, and functions on the route to be major factors in the route selection. A comparison with results of a field survey in the case of a tsunami evacuation drill at the coastal village in Sendai city shows that with the improved model, we obtained more than 80% agreement on selection of evacuation routes and time to the safety area. Secondly, we designed a questionnaire to be distributed at the time of the drill, which provided us with information to determine route selection process, parameters and initial conditions of the evacuations. Furthermore, the improved model, including means of evacuation, such as by foot or in vehicles, is developed and applied to this area. In the case assuming that all residents evacuate at the almost same time in the night, it is suggested that most traffic congestion occurs on the major roads, which long time it takes people to complete the evacuation.

キーワード：避難シミュレーション，経路選択，アンケート調査，交通渋滞

Key words : evacuation simulation, course choice, questionnaire survey, traffic congestion

* 株式会社防災技術コンサルタント
Engineering Disaster Prevention Co., Ltd.
** 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

本論文に対する討論は平成17年8月末日まで受け付ける。

1. はじめに

各種災害時、特に津波災害において、人的被害を最小限に押さえるためには、住民の迅速で的確な避難行動が重要な役割を担うことは認識されつつある。ただし、避難行動を適切に促したり、安全な経路を通じて避難所に誘導するための地域計画を作成するツールがないために、具体的な地域での検討がされていないというのが現状である。特に、各人の固有の人間行動を考慮する必要がある。従来、研究分野より幅の広い領域を扱う必要がある。

現在、避難行動を予測するための手法の一つに、人間行動や地域特性、外力状況をモデル化したコンピュータ・シミュレーションがある。その中で、今村・他(2001)は、津波来襲時の避難シミュレーションモデルを開発し、それを1993年北海道南西沖地震における奥尻島青苗地区の避難行動に適用し、その妥当性を示した。このモデルは、避難者を個人で扱い、避難手段として徒歩と自動車の2種類を仮定している。また経路選択の判断基準として、より標高の高い交差点へ避難するようになっている。ただし、これだけでは経路選択の判断基準としては不十分であり、また避難開始時刻や避難手段は、災害後に実施されたアンケート調査結果(東京大学社会情報研究所, 1994)を基に設定している。本モデルを今後津波災害の恐れのある沿岸地域に適用するためには、住民の津波避難に対する意識・意向について、何らかの手法を用いて把握する必要がある。

既存の住民という個人を対象とした避難シミュレーションを整理すると、まず熱海市(1987)のモデルでは、市民、従業員、観光客、海水浴客と、それぞれの属性ごとに意識調査を行い、その集計結果から入力条件を一様に与えているため、個人での意識の違いは考慮されていない。また高棟ら(1995)のモデルでは、1982年長崎水害を対象としているが、事前の意識調査を行っていないので、個人での意識は開発者側の仮定でランダムに設定してある。また石橋・他(2002)のモデルでは、観光客を対象としてシミュレーションを実行しており、住民を対象としていない。また観光

客の属性も同様としている。以上のシミュレーションに共通して言えることは、避難者の住民の地域性(災害経験等)や個人での意識の違いを、調査に基づいて設定していないことである。

そこで本研究では独自の調査を実施することにより、対象地域の住民の津波避難に対する意向について把握し、住民の意識をどのようにモデルに取り込めるのかを検討し、その結果から今村・他(2001)のモデルを改良することを試みる。さらに、各避難者に与えられるパラメータを、調査結果を用いて設定し、対象地域の避難行動を適切に表現できる精度の高い避難シミュレーションを構築することを目的とする。

2. 経路選択モデル(総合的判断)

2.1 概要

今村・他(2001)のモデルでは、津波からの避難ということで、標高のより高いノードを目指すものとした。ただし実際の避難行動では、その他にも様々な要因によって経路選択が行われるものと思われる。そこで本章では、それらの要因を抽出するために現地調査を行い、その結果を用いて新たな経路選択モデルを提案する。

2.2 調査概要

これまで経路選択に関する二度の調査を行ってきた。

一つは、住宅密集地内における大地震・火災を想定しての調査である(今村・他, 1999)。対象被験者は、対象地域を知っている人と知らない人の双方を選んだ。また調査を昼と夜の場合に分けて行った。

もう一つは、沿岸地域の住民(21世帯, 1世帯1~6人)に津波警報が発令されたと想定してもらい、同時刻に一斉に避難を開始してもらい、家族単位で、徒歩により、自宅から指定避難所まで移動してもらうものである(鈴木・他, 2001)。

どちらの調査も、各被験者に調査員を一人ずつ配置し、交差点ごとに避難経路の選択理由を聞き取りながら移動した。調査の様子を写真1に示す。

二度の調査結果から経路選択理由として以下の



写真1 避難行動調査の状況。各被験者に調査員を一人ずつ配置し、交差点ごとに避難経路の選択理由を聞き取りながら移動した。

項目が挙げられた。

- ① 全くの勘 (ランダム的な判断)
- ② 道路・経路を知っている (地理認知度)
- ③ 標識 (通学路, 指定避難所案内, 地図等) から
- ④ 主要な道路 (国道, 市道等) を目指す
- ⑤ 地盤の高い方へ (標高)
- ⑥ 他の人についていく, もしくは自分たちで決めた道を行く
- ⑦ 川沿いへ出る, もしくは避ける
- ⑧ 堀を越えたいため, 橋を渡る
- ⑨ 近いから (最短経路)
- ⑩ 海から遠ざかる方向

2.3 経路選択のモデル化

交差点において複数の経路から1つを選ぶためのモデルには, 主に2つの考え方がある。

- I. 段階的判断…ある方向の経路が, 1つの項目でも所定の条件を満足する場合に選択されるケース。
- II. 総合的判断…各項目の効果のある経路毎に加算して, 最もその値が大きい経路を選択するというケース。

現地調査で被験者から経路選択の理由を聞いた際に, 前章の項目のうちの複数を挙げるケースが何度かあり, II. である傾向が多かった。よって

基本モデルは, 前節で述べた各項目を避難者が総合的に考慮して経路選択を行うと仮定した, 総合的判断の方法を用いる。

総合的判断には以下の式を用いる。

$$S_k = \sum_{j=1}^n I_j L_{kj} \quad (1)$$

ここに, S_k : 接続リンク k の総合評価値

j : 経路の選択理由の項目

n : 項目の総数

I_j : 避難者の項目 j の重要度

L_{kj} : 接続リンク k がもつ項目 j の評価値

避難者は, (1) 式の S_k が最大であるリンク k を選択して移動する。

このモデルの特徴は, 道路情報 (L_{kj}) と避難者情報 (I_j) の両方の情報から経路選択を行うことであり, 全て内生的な判断で経路選択が決まることになる。したがって, 他地域への応用が利き, また避難者の避難経路に関する意識もある程度考慮できるのが特徴である。

経路選択理由の各項目について, (1) 式の L_{kj} の値の定義を以下に説明する。

- ① 全くの勘 (今回モデルに含まず)
- ② 地理認知度

地理認知度がほぼ100%で, 避難所までの経路をほぼ知っているような避難者の場合, 出発地から避難地までの経路を, あらかじめ入力情報として与える, 外生型の方式が必要となる (例えば清野・他, 1994)。ただしこの方式では, 道路情報を考慮せずに経路選択を行うので他地域への応用が利かないこと, 入力情報が膨大になること, また道路情報が変化したとき (交通渋滞等) の迂回行動を導入しにくくなる等から, 避難シミュレーションの経路選択モデルとしてはふさわしくないとと思われる。

地理認知度の要素もノードあるいはリンクに情報を持たせる必要がある。本モデルでは, リンクに避難所への方向の情報を与える。 L_{kj} の定義は, 避難所まで順方向の場合 $L_{kj} = 1$, 情報がない場合 (どちらのノードも避難所までの距離があまり変わらないとき) $L_{kj} = 0.5$, 逆方向の場合 $L_{kj} =$

0, とする。

③ 標識

標識は普通、板の片面に描かれているので、表側からしか見えず裏側からは認識することが出来ない。よって、標識がどの方向を向いているのかもモデルに組み込む必要がある。

本モデルではリンクに、

● 標識があるかないか

● (あるとしたら) どちらのノードから見えるかの情報を与える。標識が見える場合は $L_{kj} = 1$, 見えない場合は $L_{kj} = 0$ とする。

④ 主要道路

主要道路上のノードに情報を与え、主要道路に向かう方向を $L_{kj} = 1$ とし、それ以外は $L_{kj} = 0$ とする。

⑤ 標高

今村・他(2001)のモデルでは、標高のみで経路選択を行っていたが、本モデルでは総合的判断の1項目として標高を用いることとする。 L_{kj} の定義は、下り勾配の場合 $L_{kj} = 0$, 同じ標高の場合 $L_{kj} = 0.5$, 上り勾配の場合 $L_{kj} = 1$, とする。

⑥ 追従行動

前方20mに他の避難者がいる場合に $L_{kj} = 1$, いない場合は $L_{kj} = 0$ とした。ここで前方20mとしているのは、交通密度による減速度の計算が、前方20mにいる他の避難者を対象としているので、その結果を参考にして決めている。

⑦ 川沿いへ出る

川沿いは津波が遡上する危険性があるために、避難経路としては望ましくない。このような危険性も評価値に入れる必要があるが、調査でそのような危険性を全く意識せず、川沿いを避難した被験者が何人か観察された。川沿いへ向かう方向を $L_{kj} = 1$, それ以外の方向を $L_{kj} = 0$ とする。

⑧ 橋を渡る

調査対象地域の一つ(沿岸地域)では、堀に架かる橋が、交通密度、危険性などの点から避難経路の中でも重要な要素となった。図2-①の交差点で、橋を渡る人と渡らない人で2方向に分かれた。したがって、このようなポイントとなる道路を越えるか越えないかの要素も、経路選択理由として

挙げることにした。リンクが橋であるとき $L_{kj} = 1$, それ以外のリンクは $L_{kj} = 0$ とした。

また調査で経路選択理由の項目に挙げられていた中で、今回はモデル化を見送るものは、以下の項目である。

⑨ 最短経路

最も回答数の多い項目である。また、現存する多くの避難シミュレーションモデルにおいて用いられている経路選択方法である(例えば高棹・他, 1995)。ただし本シミュレーションにおいては、現状では組み込むことが難しいため、この項目を組み込むことに関しては今後の課題となる。

⑩ 海から遠ざかる方向

この項目に関しては、第3章に示すアンケート調査において、目指す避難場所として「内陸の方」「海から遠ざかる方向」と回答している人がおり、またモデルにおいて「目指す避難場所」を避難者によって区別することによって表現している(第3章で詳しく説明する)。したがって経路選択の判断基準としては、今回は取り入れないこととする。

2.4 モデルの検証

以上、開発・改良を行った経路選択モデルによる避難経路と、調査による避難経路とを比較し、モデルの検証を行うこととする。

対象地域は仙台市若林区七郷地域(図1)とする。対象地域の道路状況をネットワーク化したものを図2に示す。対象被験者は、貞山堀より海側の住民(21世帯, 1世帯1~6人)であり、津波警報が発令されると想定してもらい、同時刻に一斉に避難を開始してもらい、家族単位で、徒歩により、自宅から指定避難所まで移動してもらった。その結果、図2に示すような避難経路が取られた。

シミュレーションを行うにあたって、経路選択理由の各項目について式(1)の I_j を設定しなければならない。調査では経路選択理由の聞き取り調査も行ったので、基本的にその調査結果から設定することとし、以下のようにした。

② 地理認知度

今回の被験者はすべて地元住民であるので、対象地域の道路状況はほとんど知っているものとし

て、地理認知度は100%とする。したがって I_j も100.0とし、この項目を最優先させて経路選択を行うものとする。

③ 標識

調査において仮想的に案内板（避難標示）を設置したが、経路選択理由としては挙げられていなかった。これは今回の被験者が全て住民であった

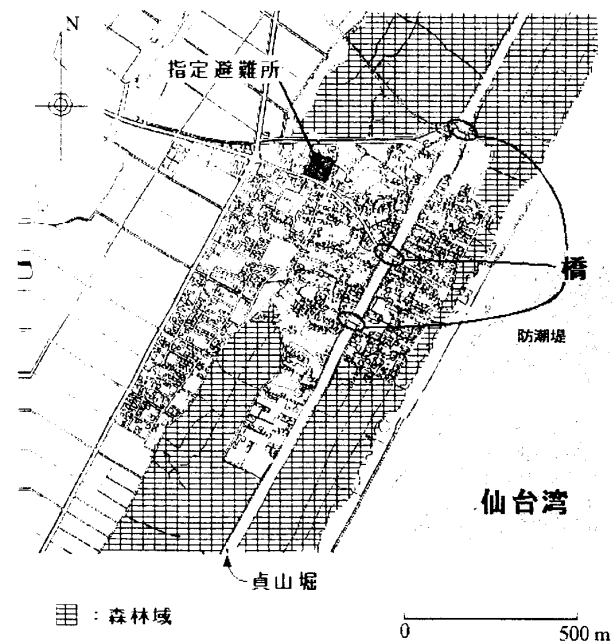


図1 経路選択モデルの検証地域（仙台市若林区七郷地域）

ため、避難経路をあらかじめ知っていたからであると思われる。案内板は、観光客、海水浴客等の地理認知度の低い避難者については導入すべきであるが、今回は避難者が全て地元住民であるので、判断基準に取り入れれないこととする。したがって I_j は一律0.0とした。

④ 主要道路

幅の広い道路、または人通りの多い道路の方へ避難する、と回答した世帯（4世帯）に対し、 I_j を1.0とし、その他の避難者は0.0とした。

⑤ 標高

今回の対象地域は平坦な地形であるため、また調査においても経路選択理由に挙げられていなかったため、 I_j は一律0.0とした。

⑥ 追隨行動

聞き取り調査の質問項目の「周りの人の行動を気にしますか？」に対する回答に対して、 I_j を以下のように設定することとする。

気にする、ついていくと回答	: 1.0 (5世帯)
気にしないと回答	: 0.0 (9世帯)
無回答	: 0.5 (7世帯)

⑦ 川沿いへ出る

調査で川沿いの危険性を全く意識せず、貞山堀沿いを避難した被験者が3世帯観察された。したがって I_j は、その3世帯を1.0とし、その他の避

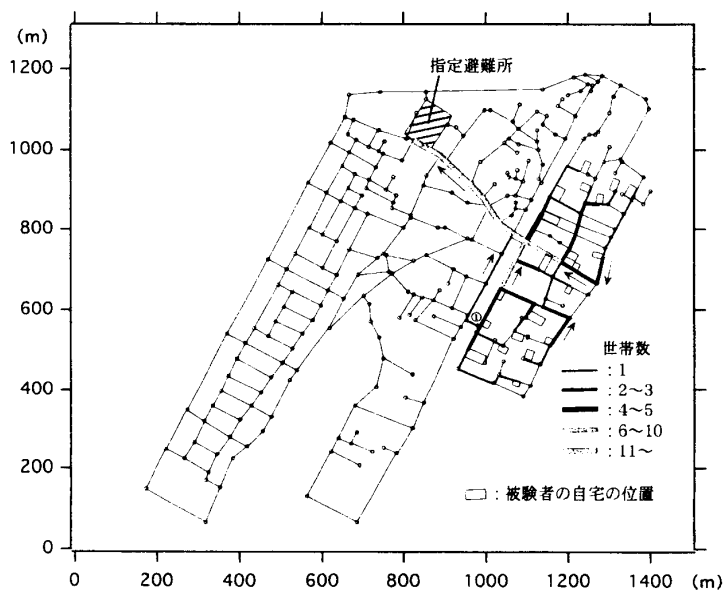


図2 モデル検証地域の道路をネットワーク化した結果と調査で得られた避難経路

難者は0.0とした。

⑧ 橋を渡る

図2-①の交差点で、橋を渡った避難者（1世帯のみ）を、 I_j を1.0とし、その他の避難者を0.0とした。

以上の経路選択モデルによる、調査の被験者を対象としたシミュレーション結果を図3に示す。調査による避難経路と一致した世帯は、18/21（約86%）となり、大部分の避難者の避難経路と一致させることができた。

3. アンケート調査と避難者情報の改良

3.1 目的

津波来襲時の避難シミュレーションモデルを用いて、対象地域の避難行動を適切に表現・予測するためには、対象地域の住民の津波避難に対する意識・意向について把握する必要もある。そこでここでは、対象地域の住民に対してアンケート調査を実施することにより、地震発生および津波警報発令を想定した上での住民の対応行動の意向について把握することを目的とする。またその結果を用いて、避難シミュレーションをさらに改良し、各避難者に与えられるパラメータを調査結果を利用して設定することとする。

3.2 調査概要

対象地域は、図1に示す仙台市若林区七郷地域とする。調査は対象地域の各家庭を訪問して、1世帯につき回答者を一人とし、ヒアリング形式とした。また、昼夜の避難行動特性の違いを把握するために、昼と夜に区別して実施した。まず昼の14:00~16:00に実施し、そのとき訪問した世帯を、回答した世帯、拒否した世帯、留守だった世帯、に区別した。その後、夜の17:30~19:30に実施し、昼に留守だった世帯と、昼に訪問していない世帯に対して訪問した。

調査内容を以下に示す。

- 1) 家族構成（年齢、性別、避難歩行の困難な人の有無、普段の平日の昼と夜に在宅しているか、外出しているか）
- 2) 地震発生時（震度3程度、震度5弱程度、地震がない場合の3ケース、1世帯につき1ケースの質問）とその後大津波警報が発令された場合の対応行動
- 3) 周囲でどのようなことが起こったときに、自宅から避難行動を開始するか（避難のきっかけ）
- 4) 緊急避難時に持ち出す物
- 5) 避難手段（自動車の場合、何台で避難するか）

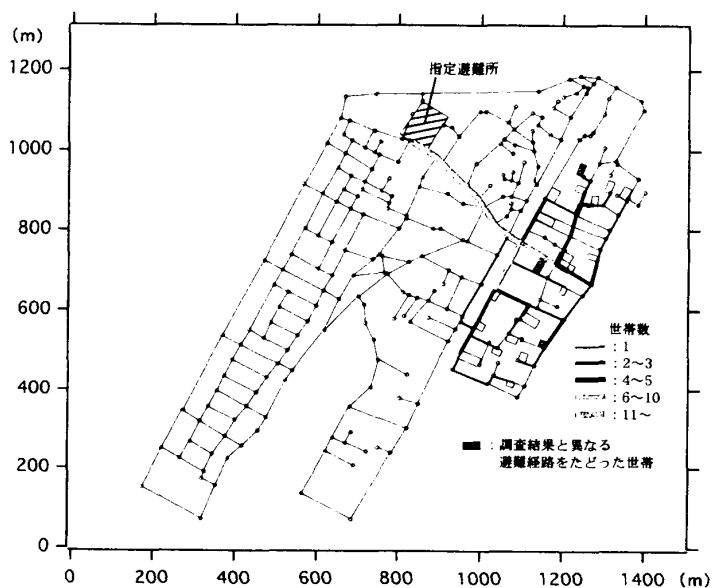


図3 改良後の経路選択モデルによる避難経路

- 6) 誰と避難するか (避難形態)
 7) 目指す避難場所とその場所までの経路 (地図上に記述)
 8) 避難経路を選択する際に、どのようなことを意識するか

なお設問 2) ~ 6), 8) は多肢選択法とする。これらの質問項目および選択項目に関しては、都市防災研究所 (1996), 東京都立大学 (1994), および東京大学 (1994) によって報告されている, 1983 年日本海中部地震および 1993 年北海道南西沖地震の後に行われた, アンケート調査の結果得られた住民の対応行動を基に決定している。

3.3 調査結果と避難者情報の改良

調査期間は 2000 年 5 月 ~ 7 月とした。対象地域の世帯数はおよそ 690 世帯であり, 全世帯対象の調査とした。そのうち回答数は, 昼 198 世帯, 夜 169 世帯, 合計 367 世帯で, 回答率はおよそ 53% である。

以下ではアンケート調査から得られた結果より, 避難シミュレーションにおける避難者情報を改良した点, もしくは新たに加える情報等について説明する。

- 2) 地震発生時とその後大津波警報が発令された場合の対応行動
 3) 避難のきっかけ
 4) 緊急避難時に持ち出す物

これらはシミュレーションの避難者情報における, 避難開始時刻 (家から出発する時刻) の設定に大きく関わる項目である。避難開始時刻は, 本避難シミュレーションにおいて, また実際の避難行動において, 特に重要なパラメータであり, 今後その設定方法について, 詳細に検討する必要がある。

5) 避難手段

本避難シミュレーションでは, 既に徒歩と自動車の 2 つの手段が考慮されている。調査においてもほとんどの回答者がそのどちらかを回答していたため, そのまま徒歩と自動車の 2 つの手段のシミュレーションとする。

- 6) 誰と避難するか (避難形態)

対象地域の 90% 程度, ほとんどの住民が, 家族全員そろっての避難を考えていた。また実際の災害事例 (1993 年北海道南西沖地震時の奥尻島青苗地区) においても, 61% の住民は家族全員そろって避難していた。

これまでのシミュレーションでは, 避難者を個人単位で取り扱い, 避難 (歩行) 速度も年齢によって変化させてきた。つまり全ての避難者が個別に避難することになり, グループ単位での避難行動は考慮していなかった。

ただし, 今回のアンケート調査の結果から, 本シミュレーションでは, 避難者を家族 (グループ) 単位で取り扱うこととする。

それにあたり, シミュレーションの避難者情報の中に, 新たに家族の人数の情報を加えることとする。この情報は, ある時刻における道路上の交通密度を算出するのに用いられる。交通密度は, 道路上の避難者の専有面積 (自動車 = 10 m² 台, 人 = 1 m²/名) / 道路の面積で求められ, それによる減速度の計算や, 迂回行動の判断基準として用いられる。

またそのグループの避難 (歩行) 速度の設定に関しては, 岡田ら (1977) の報告によると, グループの中で最も遅い歩行者に同調する傾向が強くなる, とされている。したがって本シミュレーションでは, 臼澤ら (1997) の年齢別歩行速度の報告を用いて, 家族の中で最も遅い歩行者の歩行速度を設定することとする。

7) 目指す避難場所

図 4 は, 対象地域の住宅地図に各世帯の 7) 目指す避難場所 を分類 (色分け) した結果である。この図より, 7) 目指す避難場所 の各世帯の位置による傾向を把握することができる。

ここでは, 大きく 2 つの区域 (①と②) に分類できる。まず①の区域は, 指定避難所より海側の地域であり, 指定避難所への避難率が高くなっていることがわかる。一方②の区域では, 指定避難所から遠い世帯ほど指定避難所への避難率が低く, 様々な場所への避難を考えている傾向を確認できる。

この結果, 自治体が計画している指定避難所に

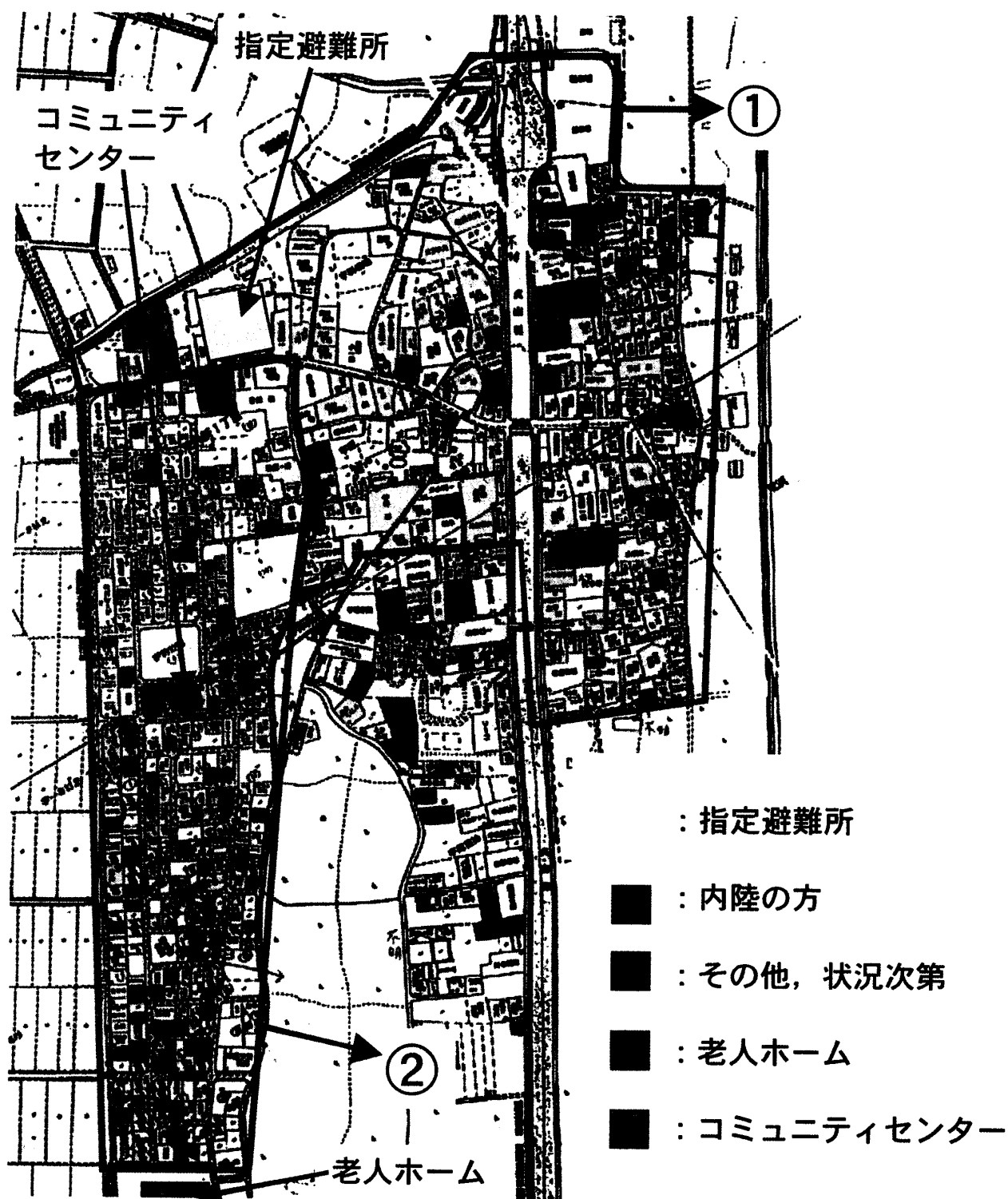


図4 対象地域の住宅地図上に各世帯の目指す避難場所を分類(色分け)した結果

限らず、様々な場所が挙げられていることがわかる。このような傾向は、他の地域において同様の調査を行う場合にも予想できる傾向である。よって避難シミュレーションを行う場合にも、全住民

が指定避難所へ避難することと仮定せず、様々な避難先を考慮しておく必要がある。

そこで本シミュレーションでは、目指す避難場所を1ヶ所に限らず、様々な場所に設定すること

とする。一般的に津波来襲時の避難所の考え方として、高台もしくは津波に耐えうる RC 造建物が望ましいと考えられている。対象地域内でこれらに該当し、かつアンケート調査で挙げられていた建物を、目指す避難場所として設定することとする。

そして避難者情報の中に、新たに目指す避難場所の情報を加えることとする。また、各リンクにそれぞれの避難場所に関する地理認知度の情報を与えることとする。各避難者は、それぞれの目指す避難場所に到達した時点で避難を完了するものとし、今回は避難途中で目指す避難場所を変更することはないものとする。

4. 沿岸地域への簡便な適用

4.1 概要

第2章において総合的判断の経路選択モデルの開発を行った。また第3章において、シミュレーションの入力条件となるアンケート調査を行い、さらにその結果を用いて避難者情報の改良を行った。本章ではその改良した避難シミュレーションを、沿岸地域の一区画の全住民に対して適用し、適用地域の避難システムの問題点を抽出する。

4.2 対象地域の選定

シミュレーションを適用する地域は、仙台市若林区七郷地域(図1)における荒浜字北丁, 中丁, 南丁の3町である。適用地域を図5に示す。この3町は、対象地域を沿岸に沿って縦断している貞山堀(水路)より海岸側に位置している。この地域の住民が避難行動を行う場合には、貞山堀にかかる3本の橋のいずれかを通過しなければならない。3本の橋のうち最南端の橋は、通過が可能なのは歩行者のみであり、自動車は通過できない。したがって、特に中央の橋において交通渋滞が予測される。

4.3 各データの作成

本避難シミュレーションにおいて用いるデータは、道路情報であるノードデータ、リンクデータ、避難者情報である避難者データ、の3種類である。これらのデータファイルの一部を表1, 2, 3に示す。

道路情報(リンクデータとノードデータ)は、仙台市若林区七郷地域の全域を対象として作成した。そのネットワークモデルは、図5に示したとおりである。

ここで、表1のノードの属性として、以下の情報を与える。

1: 川沿い 2: 主要道路 3: 指定避難所(南

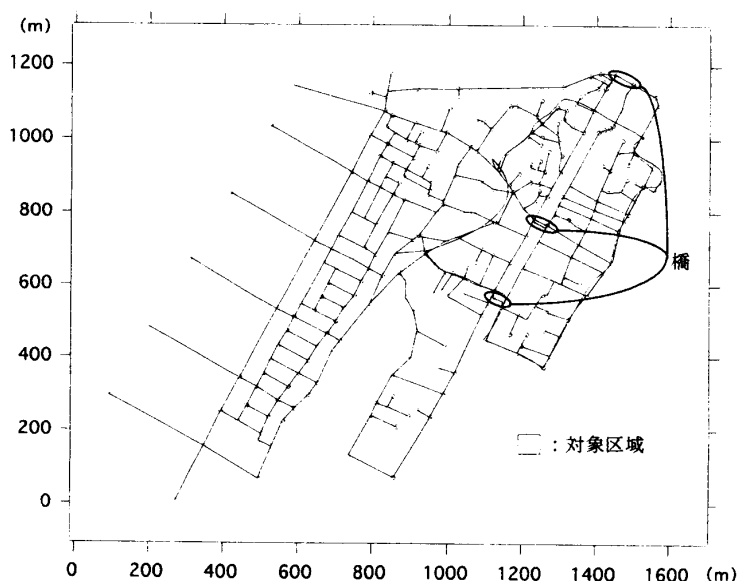


図5 シミュレーションの適用地域。対象は沿岸に沿って存在する貞山堀(運河)より海岸側の世帯とする。

側の入口) 4: 指定避難所(北側の入口) 5: 内陸の方への避難 6: コミュニティセンター 7: 老人ホーム 0: 上記のどれでもない
ここで3~7の情報は、ヒアリング調査から得られた各避難者の目指す避難場所を示している。

また、表2のリンクの属性として、以下の情報を与える。

3: 橋 0: 橋以外のリンク

また、リンクデータの「各避難場所に近いノード」については、アンケート調査の質問項目「7) 避難経路」の各避難場所までの経路の結果を用いた。

以上、今回の対象地域のノード数は288、リンク数は370となった。

表3の避難者データについて、以下に説明する。
M: 世帯番号 KL: 避難者が出発するリンク
NS: KLの始点ノード NE: KLの終点ノード S: KL上のNSからの距離(m)
つまり、避難者は避難開始地点として、どこかのリンク上にいるものとし、リンク上の位置と出発方向が与えられるものとする。

NP: 家族の人数 AG: 避難者の速度 TS: 避難開始時刻(min) HV: 避難手段(1: 徒歩, 2: 自動車) EP: 目指す避難場所(数値はノードデータの属性と一致する)。

また、IG~IBは、避難者の経路選択理由の項目の重要度((1)式の I_j)を表す。それぞれの項目は、IG: 地理認知度 IH: 追従行動 IS: 案内板 IL: 標高 IR: 川沿い IM: 主要道路 IB: 橋である。

避難者情報は、図5に示した区域の全世帯の住民に関して作成する。以下ではその作成手順について説明する。

(1) NP, HV, EPの設定

① 対象世帯のうち、アンケート調査で回答が得られた世帯に対して、その回答結果から、NP, HV, EPを入力する。ちなみに今回の適用区域で回答が得られた世帯数は、135世帯(回答率: 50%)であった。また、自動車を2台以上用いる世帯に関しては、台数分だけ世帯数を増加することとする。

表1 ノードデータ

ノード番号	属性	接続リンク							標高 (m)
101	0	101	460	461	000	000	000	000	10.0
102	0	101	102	000	000	000	000	000	10.0
103	0	102	103	104	000	000	000	000	10.0
.
.

表2 リンクデータ

リンク番号	属性	両端のノード	幅 (m)	長さ (m)	各避難場所に近いノード					
101	0	101 102.0	6.0	74.8	000	000	101	000	000	000
102	0	102 103.0	5.5	112.6	000	000	102	000	000	000
103	0	103 104.0	4.0	17.5	000	104	000	000	000	000
.
.

表3 避難者データ

M	KL	NS	NE	SS	NP	AG	TS	HV	EP	IG	IH	IS	IL	IR	IM	IB
1	266	238	237	23.8	4	1.9	0.0	1	3	20.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
2	241	216	238	0.0	4	1.9	0.0	1	3	20.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
3	266	238	237	11.9	3	8.3	1.0	2	5	20.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0
.
.

- ② 区役所の町名別世帯構成人員別統計から、アンケート調査で得られた町名別世帯構成人員別統計を引くことにより、アンケートが得られなかった世帯の町名別世帯構成人員別統計を算出した。このデータから、アンケートが得られなかった世帯のNPを入力することとする。このとき住宅地図から、敷地が広い世帯から順に、多いNPを入力することとする。
- ③ アンケートが得られなかった世帯のEPを入力する。このとき、図4の結果を用いて、各世帯の位置によって、その割合を変化させることとする。今回の適用地域は、図4の①の区域に相当する。①の区域は、指定避難所への避難率が81.6%、内陸の方への避難率が18.4%であった。この割合を用いて、アンケートが得られなかった世帯にランダムに設定した。
- ④ 図6は、アンケート調査の7) 目指す避難場所として「指定避難所」「内陸の方」と回答した人に対してそれぞれ5) 避難手段を調べた結果である。指定避難所への避難者は、自動車よりも徒歩の方が、若干割合が高くなっている。それに対し内陸の方への避難者は、自動車の率が極めて高くなっている。この結果は、避難場所への距離が大きく関係し、より遠くへ避難したい場合には自動車の率が高くなるということを示している。
- また、指定避難所へ避難する世帯を対象に、避

難手段を住宅地図に分類（色分け）した結果を、図7に示す。さらに図7を、図のようにコンパスを用いて指定避難所までの距離別に各世帯を区別し、避難手段の割合を調べた結果を図8に示す。これらの結果から、指定避難所にごく近い世帯はほとんど徒歩であるが、指定避難所から遠い世帯ほど、自動車の割合が高くなっていることが確認できる。

そこで、まず図6の結果より、EP別にアンケートが得られなかった世帯のHVを入力することとする。

EP = 5（内陸の方への避難者）は、昼夜総合で、徒歩が12.9%、自動車が87.1%であった。この割合でランダムに設定した。

EP = 3, 4（指定避難所への避難者）については、図8の結果より、指定避難所までの距離に応じてHVの割合を変化させることとした。

- ⑤ 自動車で避難しようと考えている人に対して、何台で避難するかを、家族の人数別に区別した結果、家族が5名以下の場合は1台で避難し、6名以上になると2台使用するようになることがわかった。

この結果より、HV = 2の世帯に関して、 $1 \leq NP \leq 5$ の世帯は自動車を1台、 $6 \leq NP$ の世帯は2台用いて避難することとした。したがって、HV = 2、 $6 \leq NP$ の世帯は世帯数（自動車の台数）を増加した。

以上、自動車の台数を増加させたことにより、

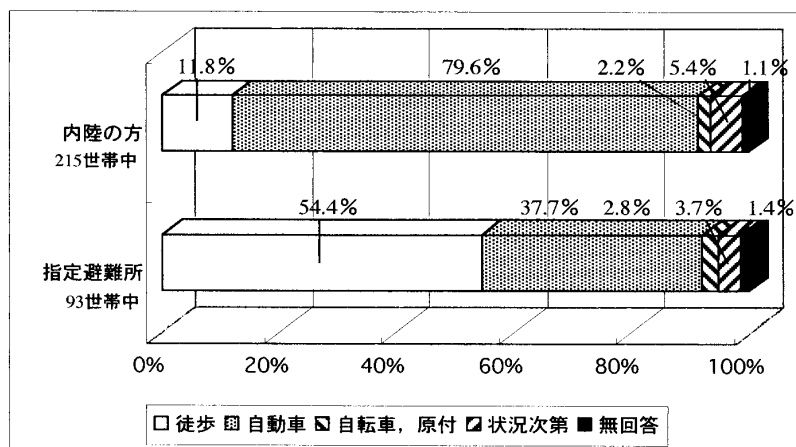


図6 目指す避難場所として「指定避難所」または「内陸の方」と回答した人に対して、避難手段を調べた結果

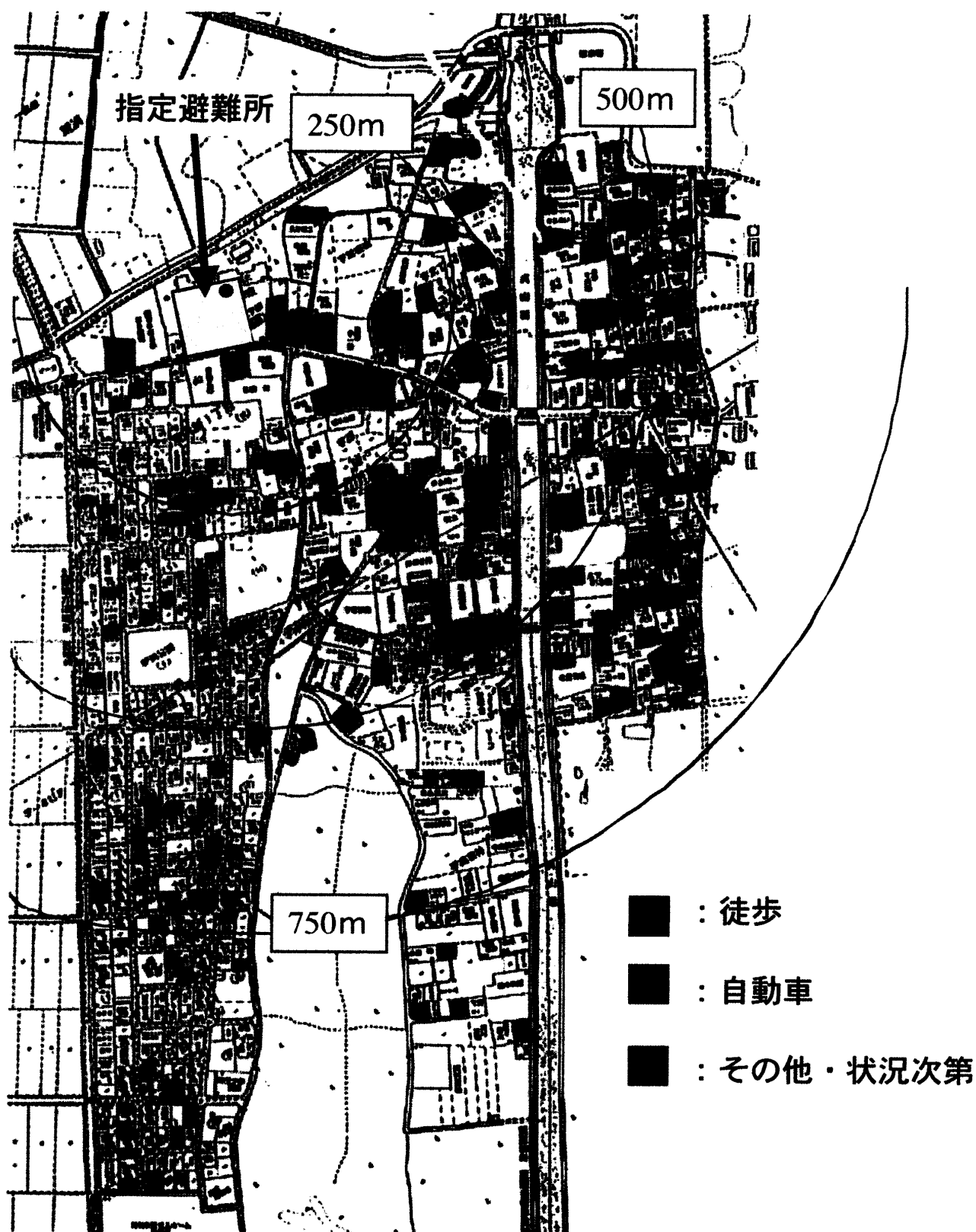


図7 指定避難所へ避難する世帯を対象に、避難手段を住宅地図に分類（色分け）した結果

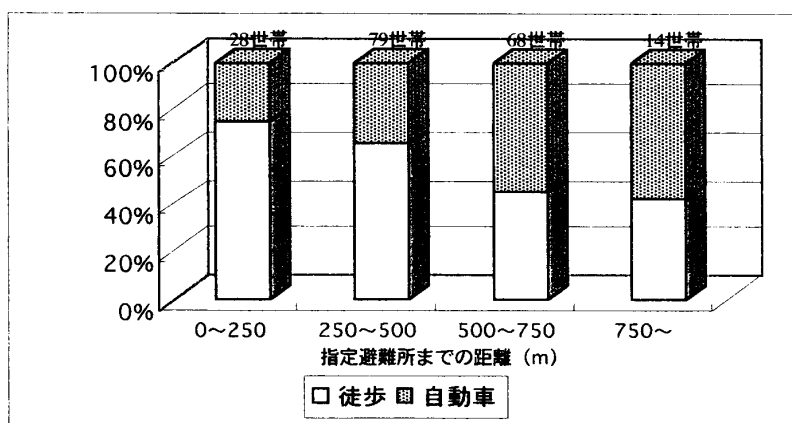


図8 図7のようにコンパスを用いて指定避難所までの距離別に各世帯を区別し、避難手段の割合を調べた結果

対象世帯（グループ）数が310グループとなった。うち、歩行者のグループが139（540人）、自動車の台数が171台（533人）となり、避難者の総人口は1,073人となった。

(2) 全ての世帯に対して、KL, NS, NE, SSをそれぞれ入力する。

(3) AG（避難者の速度）の設定

① HV = 2（自動車）の避難者は、最高速度を 8.3 m/s (= 30 km/h) と仮定し、入力した。

② HV = 1（徒歩）の避難者について、アンケートが得られた世帯については、臼澤ら（1997）の年齢別歩行速度の報告より、家族の中で最も遅い避難者の歩行速度を設定することとする。その結果、 $0.95 \sim 1.10 \text{ m/s}$ (= $3.4 \sim 4.0 \text{ km/h}$) となり、ほとんど（約89%）の避難者が 0.95 m/s の歩行速度となった。

アンケートが得られなかった世帯については、アンケートが得られた世帯の各歩行速度の割合に応じて、ランダムに設定した。

(4) IG, IH, IS, IL, IR, IM, IBの設定

IG, IS: 避難者が全て地元住民であるので、IGは100.0, IHは0.0と設定した。

IH, IL, IR, IM, IB: アンケート調査の質問項目「8）避難経路を選択する際に、どのようなことを意識するか」の結果より、その割合に応じてランダムに設定した。

また想定条件は、ほとんどの人が帰宅していて最も人口が多くなっており、交通渋滞の危険性が

予測される夜間を想定する。各避難者の避難開始地点を図9に示す。またTS（避難開始時刻）に関しては、最も交通渋滞を引き起こしやすい条件として、対象地域の住民が一斉に避難した場合を想定した。また自動車による避難については、徒歩の避難者よりも目安として1分遅らせることとした。

4.4 適用結果と考察

シミュレーション結果の例として、徒歩の避難者が一斉避難開始してから100秒、200秒、300秒、740秒後における避難途中の避難者の位置を、図10a~dに示す。

図10a以降からわかるように、自動車が一斉に避難を開始してから数10秒後に、図10aの①の道路において過剰な交通渋滞が発生している。その結果、図10b, 図10cに示すように、周辺の道路へ迂回する自動車が多く観察された。本シミュレーションでは、避難速度が、交通密度が0の時の避難速度より半分以下に低下するほど交通密度が高い場合に、このように最適リンク（(1)式の S_k が最大であるリンク）を避けて、2番目に S_k の値が大きいリンクを選択することになっている（今村・他, 2001参照）。ただしその結果、図10dに示すように、ある程度交通渋滞が解消されても周辺の道路から脱出できず、避難時間を大幅に要した自動車が観察された。対象地域の街路状況をほぼ把握している住民が、このような迂回路の判

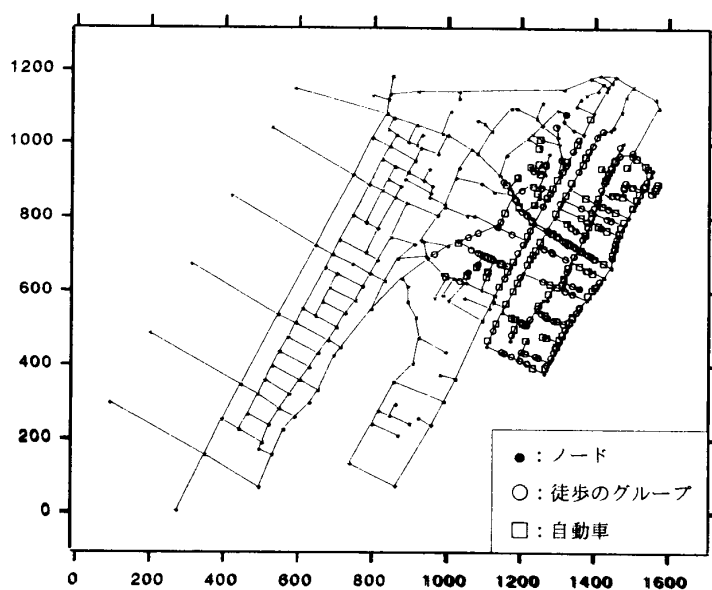


図9 各避難者の避難開始地点。ほとんどの人が帰宅し最も人口が多くなるために交通渋滞の危険性が最も予測される夜間を想定した

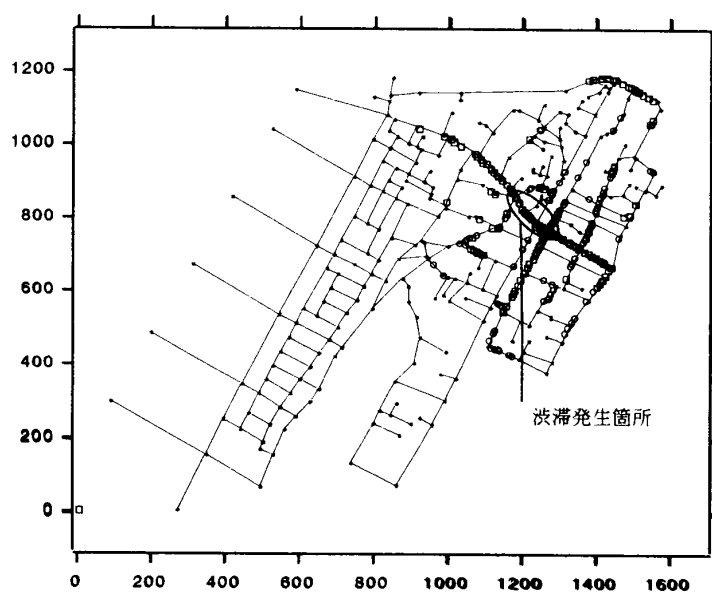


図10a 徒歩の避難者が一斉避難開始してから100秒後における避難状況

断ミスをするのは考えにくく、このような迂回行動の判断基準について更なる改良が必要であると考えられる。

また、アンケート調査から得られた各世帯の予測避難経路の集計結果を図11に、またシミュレーションによる避難経路の集計結果を図12に、それぞれ示す。ただし、前節の各データの作成方法

の中で、ランダムに設定している部分は、5回のシミュレーションを行った結果の平均値で算出した。

この2つの図の避難経路を比較すると、図11の①や②の交差点において、主要な避難経路が異なっていることが確認できる(①では、アンケートでは右折2世帯・直進1世帯、シミュレーショ

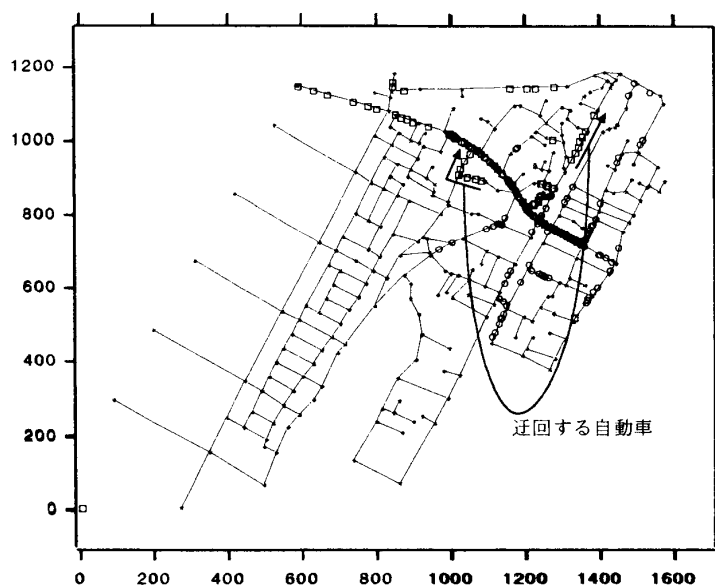


図 10b 徒歩の避難者が一斉避難開始してから 200 秒後における避難状況

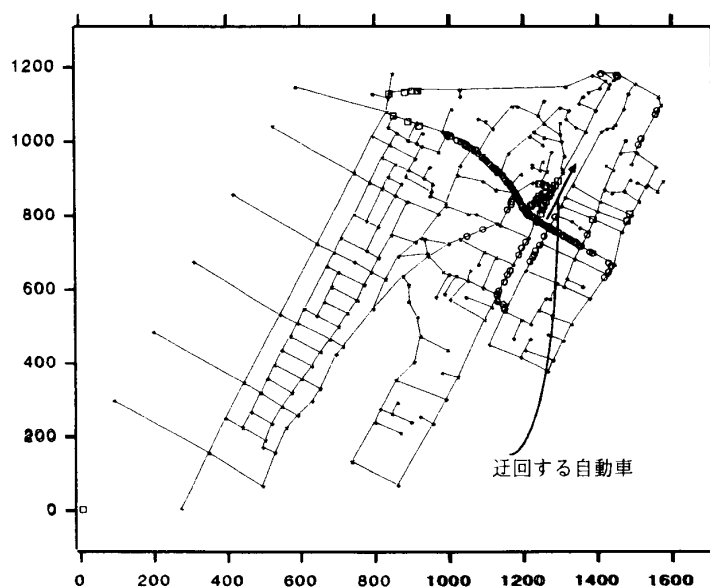


図 10c 徒歩の避難者が一斉避難開始してから 300 秒後における避難状況

ンでは右折 0 世帯・直進 4 世帯。②では、アンケートでは右折 0 世帯・直進 3 世帯、シミュレーションでは右折 5 世帯・直進 0 世帯)。アンケート調査では目指す避難場所までの最短経路を選択した結果であると予測でき、シミュレーションではそのような判断基準を導入しなかった結果である。この結果から、やはり最短経路の判断基準が経路選択モデルに必要であることが確認できた。

また図 12 に示すように、目指す避難場所を各避難者によって区別したことにより、指定避難所への避難者と、内陸の方への避難者とを区別することができた。また図 12 の結果からも、③の道路で発生する交通渋滞により、各世帯が予定していた経路 (図 11) とは異なる周辺への道路への迂回経路が確認できる (例えば、図 12 に示す小矢印について、それぞれ 15 世帯 (4.8%), 18 世帯

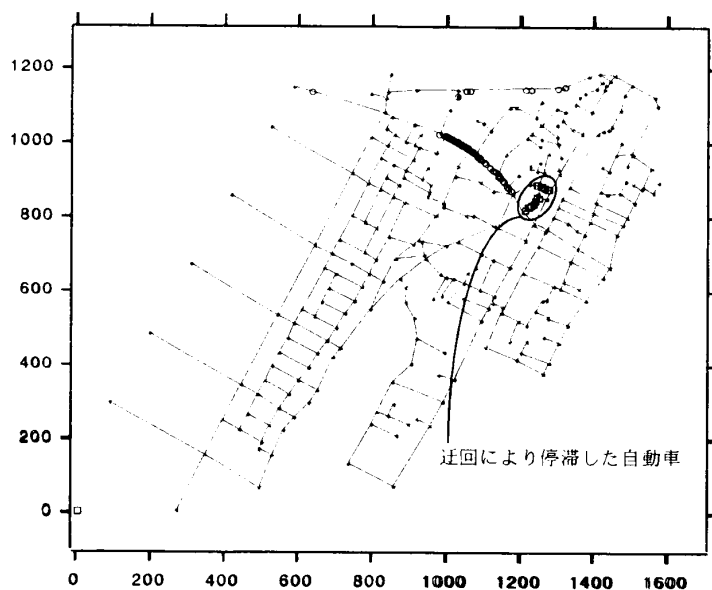


図 10d 徒歩の避難者が一斉避難開始してから 740 秒後における避難状況

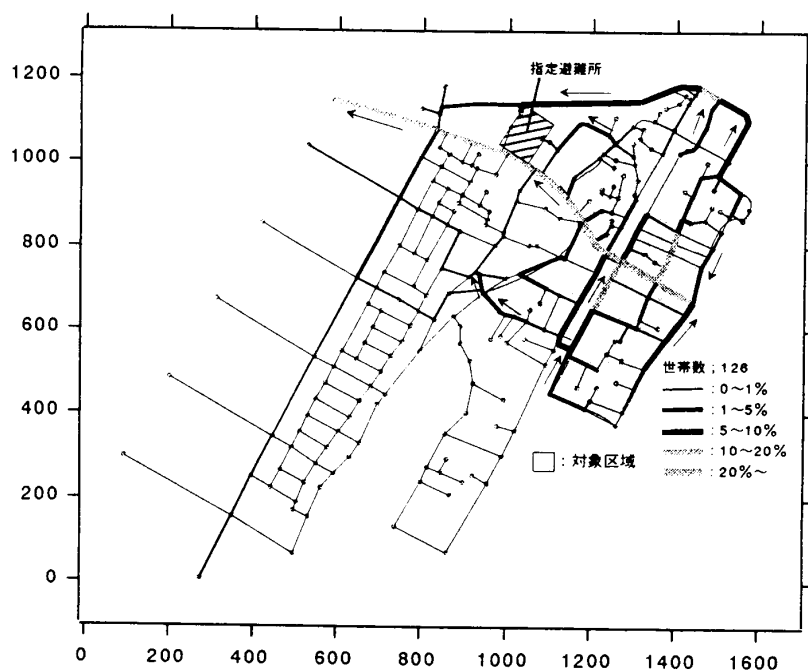


図 11 アンケート調査から得られた各世帯の予想避難経路の集計結果

(5.8%) が迂回している)。

また、要避難時間の割合を、徒歩のグループと自動車に区別したもの、およびそれらを合計したものと、今村・他(2001)による奥尻島青苗地区の避難シミュレーション結果とを比較したものを、まとめて表 4 に示す。

まず、移動に 10 分以上要している徒歩の避難者が 66.2% と非常に多くなっている。これは、避難所までの距離が遠い世帯が多いことや、交通渋滞が発生したことによる大幅な減速の影響であると考えられる。

また自動車に関しては、避難時間が短いものか

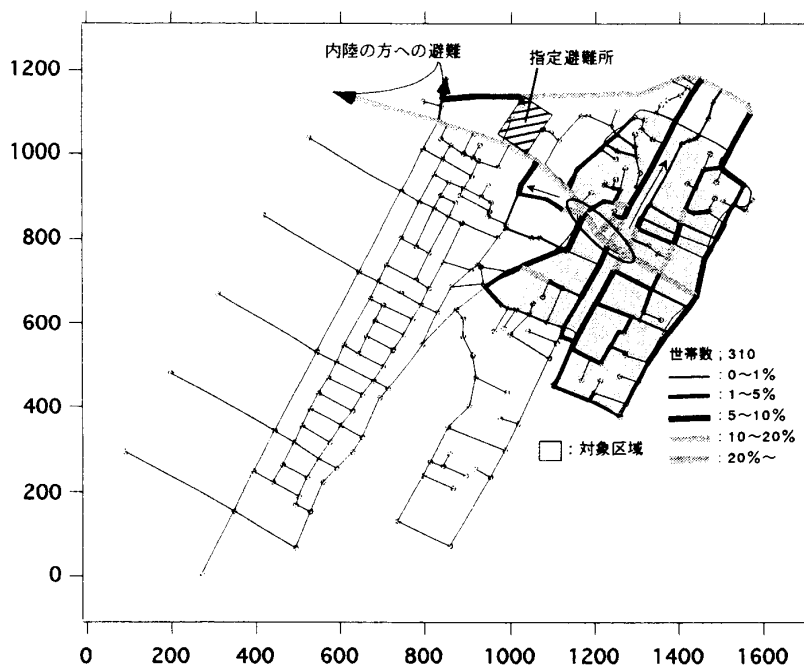


図12 シミュレーションによる避難経路の集計結果

表4 要避難時間の割合を、徒歩のグループと自動車に区別したもの、およびそれらを合計したものと、奥尻島青苗地区の避難シミュレーション結果とを比較したもの

	0~1min	1~3min	3~5min	5~10min	10min~
徒歩のグループ	0.0%	0.0%	2.9%	30.9%	66.2%
自動車	7.0%	48.0%	21.1%	11.1%	12.9%
徒歩のグループ+自動車	3.9%	26.5%	12.9%	20.0%	36.8%
奥尻島青苗地区の再現モデル	9.6%	47.4%	26.6%	15.9%	0.5%

ら長いものまで幅広く分布している。これは、交通渋滞に巻き込まれずに避難を完了できたものと、交通渋滞に巻き込まれて迂回もしくは停滞した自動車との差であると考えられる。

また奥尻島青苗地区の再現シミュレーションと比較すると、全体的に避難時間が大幅に長くなっていることが確認できる。この結果から、本適用地域は奥尻島青苗地区に比べて、要避難時間が全体的に長く危険度が高いと評価できる。

5. 結論

まず経路選択モデルの開発・改良のために、二度の現地調査を行い、様々な経路選択の要因を抽出した。その結果から総合的判断の経路選択モデルを開発した。そして現地調査との比較検討を行った結果、80%以上の避難者と経路を一致させるこ

とができた。

次に沿岸地域の住民に対して、地震発生および津波警報発令を想定した上での対応行動の意向の把握を目的としたアンケート調査を行い、その結果を用いて、シミュレーションの避難者情報についての改良を行った。特に、避難者をグループ単位(家族全員そろって)で取り扱うこととし、また目指す避難場所の区別を行った。

さらに、改良したシミュレーションを用いて沿岸地域への簡便な適用を行った。特に避難者情報は、アンケート調査の結果を用いて入力した。夜間に全住民が一斉に避難したケースを想定した結果、主要道路において過剰な交通渋滞が発生することや、奥尻島青苗地区に比べて避難時間を大幅に要することが確認された。

今後は本モデルを各沿岸地域へ適用し、避難シ

システムについての評価を行うことが望まれる。その際、本研究において実施したような適用地域の住民に対する意識調査は、適用地域の避難行動を適切に表現するために必要である。さらに本シミュレーションの、今後改良すべき課題としては、以下の項目が挙げられる。

(1) 避難開始時刻の詳細な設定

アンケート調査において、地震発生および津波警報発令時の対応行動、避難のきっかけ、緊急避難時の持ち出し品について把握した。これらの調査項目は、避難シミュレーションにおける避難開始時刻の設定に関わる項目である。今後はこれらの質問内容から、どのように避難開始時刻を設定するか、詳細に検討する必要がある。

(2) 交通流モデルの更なる改良

本避難シミュレーションでは交通渋滞の表現方法を、前方の交通密度による減速と、車頭間隔の確保という形で表現している。また自動車の最高速度を 30 km/h としている。ただしこれらの仮定のみでは、交通流を適切に表現しているとは言い難い。今後、より交通流を適切に表現できるよう、交通工学の立場から検討し、モデル化する必要がある。

(3) 地震による建造物の倒壊による街路閉鎖の影響の考慮

近地津波の場合、大地震が発生してから数分、数十分後に津波が来襲する。したがって実際の避難行動の際には、地震による倒壊家屋の瓦礫や電柱の倒壊・傾斜等により、道路の幅員が閉鎖され、それにより更なる交通渋滞が引き起こされることが予測される。今後、これらの障害物をどのようにモデルに組み込むべきか、検討する必要がある。

(4) 高齢者、歩行困難者のモデル化方法

今回は夜間の避難行動を想定して、全住民が在宅しているものとみなし、適用を行った。これが昼間を想定する場合には、対象地域の人口を減少させ、適用する必要がある。また昼間は、高齢者や歩行困難者が一人で在宅しているケースが多く、避難対策において大きな問題となっている。今回の適用では、高齢者や歩行困難者は特に区別していない。高齢者や歩行困難者が在宅している世帯

は、特に歩行速度や避難開始時刻が大幅に遅くなると予測される。これらのモデル化方法をどうするか、今後詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 熱海市：観光客等避難対策調査報告書，pp.99-158，1987.
- 今村文彦・鈴木 介・熊谷 純：避難時の経路選択に関する現地調査，第 18 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，pp.115-116，1999.
- 今村文彦・鈴木 介・谷口将彦：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，自然災害科学，Vol.20，No.2，pp.183-195，2001.
- 石橋健一・藤岡正樹：エージェントモデルによる災害時避難行動シミュレーションの試み—湘南海岸における事例—，オペレーションズ・リサーチ，Vol.47，No.7，pp.447-452，2002.
- 岡田光正他：建築と都市の人間工学 空間と行動のしくみ，鹿島出版会，pp.1-48，1977.
- 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.
- 鈴木 介・今村文彦：住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル，土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，pp.524-525，2001.
- 高棟琢馬・椎葉充晴・堀智晴：水害避難行動のマイ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.
- 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.7-52，pp.127-191，pp.228-372，1994.
- 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.41-80，1994.
- 臼澤秀明・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 年度東北支部技術研究発表会講演概要，pp.430-431，1997.
- 財団法人都市防災研究所：災害時の危機意識と避難行動決定要因に関する基礎的・基盤的研究，pp.107-132，1996.

(投稿受理：平成15年11月11日
訂正稿受理：平成16年12月27日)