

# 規範的避難行動に基づく避難計画モデルの 実空間における適用性の検証

大畑 長<sup>1</sup>・桑原 雅夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 東北大学大学院情報科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail: ohhata-ta@plan.civil.tohoku.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学大学院情報科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

E-mail: kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

本研究は、津波災害時の避難に着目する規範的な避難行動を仮定した避難計画モデルについて、モデルの妥当性や規範的避難行動のベンチマークとしての信頼性を検証した。モデルの妥当性の検証にあたっては、モデルで得られた規範的な避難行動が現実的な道路インフラ条件を再現する交通シミュレーション上でモデル計算時と同様に行動しうることを確認した。また、ベンチマークとしての信頼性の検証にあたっては、「出発時刻選択」「利用経路選択」「避難先選択」という避難行動の観点から、交通シミュレーションを使用し感度分析を行った。結果、いずれの観点からも、モデルで得られた規範的避難行動が避難完了時間を最小とする行動内容であることを確認した。

**Key Words :** *evacuation operation, normative models, model validation, sensitivity analysis*

## 1. はじめに

東日本大震災では、避難者の多くが自動車を利用したことにより、各地で激しい交通渋滞が発生し、避難途中で津波に巻き込まれる等、多くの犠牲者を出した。大規模地震時の交通渋滞は、避難の遅れだけでなく、交通事故の誘発や緊急車両の通行障害など、様々な影響をもたらす。各自治体は自動車避難という現実的な課題に備え、自動車避難者が迅速かつ確実に避難できる方策の検討を求められている。

筆者らはこのような課題を解決するべく、避難計画を設計する上でベンチマークとなるFirst-Bestな避難シナリオを提供するため、規範的な避難行動を仮定した避難計画モデル<sup>1)</sup>を構築してきた。当モデルは、避難者一人一人の避難行動(避難者の起点出発時刻や避難経路等)を完全に制御できる状況を仮定し、目的関数に応じた最適な行動を出力することが可能である。そのような避難行動からは、津波避難時に起きる避難遅れの問題について、その原因が避難インフラ側にあるのかそれとも避難行動側にあるのか、それぞれどちらに起因するかを示唆することが可能である。

しかし、一方で、当モデルを実務の施策検討時に使用することを想定した場合、大きく2つの問題を有すると考えられる。一つは、当モデルの道路ネットワークは現

実の道路に存在する車線構成や信号規制などの情報をそぎ落とし、近似したネットワークを使用している点である。このことから、モデルから得られた避難行動が現実空間でも等しく再現可能な行動であることを保証しているものではない。

もう一つは、現実の避難を想定すると、避難者の行動は完全に制御できるものではない。避難者は規範的避難行動と乖離した行動をとることが想定される中で、当モデルで得られた避難施策が確かにベンチマークとなりえるかが問題になる。これらの問題は、近年の規範的な避難モデルに関する研究<sup>2)3)4)5)</sup>においても同様で、そのような観点からの検証はされていない。

そこで本研究では、まず、①避難計画モデルで得られた規範的避難行動の現実空間での再現性の検証を行う。次いで、②同モデルから得られた避難施策(改善方向性)がベンチマークとして機能することの検証を行うことで、当モデルが実務の施策検討時に役立てられるツールであることを示す。

## 2. 避難計画モデルの概要と検証の視点

### (1) 避難計画モデルの考え方

これまで構築してきた避難計画モデルの概要について

解説する。当避難計画モデルは、避難者一人ひとりの出発時刻や利用する経路といった行動を完全に制御し、最も効率的な行動をとるという規範的な避難行動を考える。このような行動を仮定することで、避難行動の不確実性を取り除き、かつ、避難者全員の避難完了時刻を最小化させることとなる。

規範的な避難行動を表現するにあたっては、時間的・空間的に動的なネットワークモデルを用いて、総避難完了時間  $\int_t \sum_d q_{od}(t) \cdot t$  を目的関数にとり、時間帯  $t$  に利用する出発地点別の道路リンク  $\lambda_{ij}^o(t)$  の交通量を決定する線形計画問題として定式化する。なお、当問題を解析するにあたっては時間軸を  $\Delta$  単位に離散化している。また、道路ネットワークをリンクとノードで表現する。道路区間を表すリンクは両端のノードを用いてリンク  $(ij)$  と記述する。当モデルで扱うネットワークは車線構成や信号制御などは考慮しない。

ここで、図-1に避難完了時間の概念を示す。図の横軸は地震発生からの経過時間を表し、縦軸に累積の避難需要を表す。左側の曲線は起点からの累積発生交通量の分布を、右側の曲線は終点である避難所への到着交通量の分布を表す。目的関数である総避難完了時間  $\int_t \sum_d q_{od}(t) \cdot t$  は着色部分の面積となる。

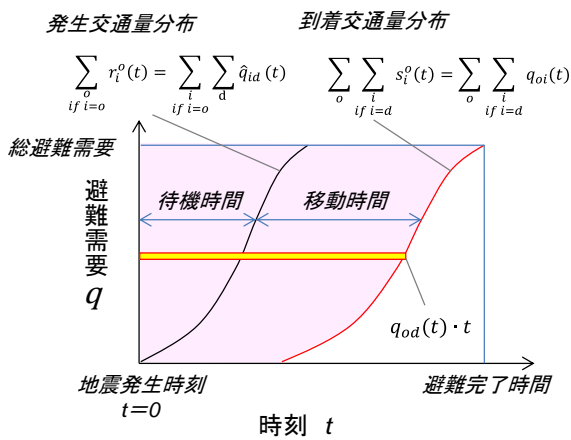


図-1 避難完了時間の概念

当モデルは、ネットワーク上の待ち行列によるリンク容量の障害を発生させないように、起点別避難需要  $r_i^o(t) (= \sum_d \hat{q}_{id}(t))$  について利用する経路  $\lambda_{ij}^o(t)$  と出発時刻  $t$  を制御する。そのため、起点上で出発までの待機時間が発生する。

求解の手順として、起点（避難者の出発地）からの避難需要は所与であり、これらの需要は目的関数が最小となるように経路と目的地を選択する。その他に、目的地となる避難所は収容台数の容量を持ち、各道路リンクの所要時間  $T_{ki}$  及び交通容量  $\mu_{ij}$  は所与とする。さらに避難所以外でのノードにおいて流出する交通は存在しないもの

とする。

(2) 定式化

当問題は線形計画問題として以下のとおり定式化される。

$$\min \sum_t \sum_{od} q_{od}(t) \cdot t \tag{1}$$

subject to

$$-\sum_k \lambda_{ki}^o(t - T_{ki}) + \sum_j \lambda_{ij}^o(t) + q_{oi}(t) = 0$$

$$T_{ki} = \text{given}, i = 1, 2, 3, \dots, N, i \neq o, \forall o \in O, \forall d \in D \tag{2}$$

$$\sum_o \lambda_{ij}^o(t) \leq \mu_{ij}, \quad \mu_{ij} = \text{given}, \forall (i, j) \in L, t \tag{3}$$

$$\sum_t \sum_o q_{od}(t) \leq \delta_d, \quad \delta_d = \text{given}, \forall o, d, t \tag{4}$$

$$\sum_t q_{od}(t) = Q_o, \quad Q_o = \text{given}, \forall o, d \tag{5}$$

$$\lambda_{ij}^o(t) \geq 0, \quad \forall (i, j), o, \tag{6}$$

$$q_{od}(t) \geq 0, \quad \forall o, d, t, \tag{7}$$

ただし、

$N$ : ノード集合、 $O$ : 起点集合、 $D$ : 終点集合、 $L$ : リンク集合

$t$ : 地震発生時刻からの経過時間、 $T$ : 避難完了時刻

$q_{od}(t)$ : 起点  $o$  を出発し時刻  $t$  に避難所  $d$  に到着する需要

$\lambda_{ij}^o(t)$ : 起点  $o$  を出発し時刻  $t$  にリンク  $(ij)$  に流入する交通量

$T_{ki}$ : リンク  $(ki)$  の所要時間 (所与)

$q_i^o$ : 起点  $o$  を出発し時刻  $t$  にノード  $i (= \text{避難所 } d)$  からネットワークを流出する避難需要

$Q_o$ : 起点  $o$  の避難需要 (所与)

$\mu_{ij}$ : リンク  $(ij)$  の容量制約 (所与)

$\delta_d$ : 避難所  $d$  の容量制約 (所与)

まず、目的関数である式(1)は、 $q_{od}(t)$  が目的地  $d$  に時刻  $t$  に到着した避難需要を表していることから、待機時間と移動時間とを合わせた総避難時間を表している。次に制約条件である式(2)は、起点  $o$  を除く任意のノード  $i$  における交通量保存則を表している。ここで、 $\lambda_{ij}^o(t - T_{ki})$  は起点  $o$  を出発し時刻  $t - T_{ki}$  にリンク  $(ij)$  に流入した交通が時刻  $t$  にリンク  $(ij)$  を流出する交通量を表している。このことは、当問題では待ち行列の発生を許していないこと、さらに、FIFOの条件下ではリンク所要時間は一定値をとることから、時刻  $(t - T_{ki})$  に流入した交通はリンク  $(ki)$  を  $T_{ki}$  の所要時間をかけて通過し時刻  $t$  にリンク  $(ki)$  を流出することとなる。式(3)は、リンク  $(ij)$  の交通容量制約を表し、式(4)は避難所  $d$  の収容容量制約を表している。式(5)は起点  $o$  が所与の避難需要に関する制約を表している。また式(6) (7)は未知数の非負制約を表す。以上より当定式化は  $q_{od}(t)$  及び  $\lambda_{ij}^o(t)$  を未知変数として、式(2)～式(7)の制約

条件下で目的関数を最小化する線形計画問題となる。

**(3) モデル検証の視点**

以上のように、当モデルは避難需要を所与のもとで、それぞれの避難者の出発時刻、利用経路、避難先を解として出力する。また、モデルの最適性条件であるKarush-Kuhn-Tucker条件から当問題の解が持つ性質を見ると、式(2)～式(7)の制約条件を資源と見たときの利用価値（潜在価格）が示され、避難インフラを含めた避難施策の改善方向性を得るものである。

しかし、当モデルから得られる解は、先ほど述べたように、現実の道路ネットワークに存在する車線構成や信号規制などの情報をそぎ落とし、近似したネットワークを用いて出力したものである。これらの解が、①現実の避難や道路ネットワークにおいても、待ち行列を発生せず、最も避難完了時間を短くする規範的な行動となりえるか、または②現実の避難を想定した場合にベンチマーク（施策の改善方向性）となりえるかは、改めて検証する必要があると考えられる。

このような検証を踏まえることで、現実の道路ネットワーク空間においても規範的な避難行動であると認められた際には、当モデルの最大の目標とする、避難遅れの問題が避難インフラ側にあるのか、それとも避難行動側にあるのかという判定が信頼できるものと解釈できると考えられる。

についてはモデル検証として大きく以下2点に取り組む。  
**検証視点1：モデル妥当性の検証**

避難計画モデルで得られた規範的避難行動が現実のインフラ（道路条件）で同じように行動できるか、効率的な避難行動となりえているか、その再現性を検証する。

**検証視点2：ベンチマークとしての信頼性の検証**

現実の避難インフラにおいて、同モデルから得られた避難行動（出発時刻、利用経路、避難先）がベンチマーク（施策改善の方向性）となるか、避難需要の各パラメータ値を変化させ感度分析を行う。

**3. モデル妥当性の検証**

前述の検証視点1に示す検証避難計画モデルの妥当性を検証する。妥当性の検証にあたっては、モデルから得られた規範的な避難行動が現実の道路交通条件下で再現可能かを確認する。ただし、現実世界で再現することは困難であることから、本研究では現実世界の道路交通条件を近似した交通シミュレーション上で再現を試みるものとした。

**(1) 妥当性の検証手法**

まず、妥当性を検証するためのモデルの比較対象について述べる。本来は、モデルの解を現実インフラに適用し確認することが理想だが、現実には困難である。そこで本研究では現実インフラの道路交通条件を交通シミュレーションで模倣し比較するものとした。モデルと交通シミュレーション及び現実世界における道路交通条件の違いを表-1に示す。当表を見てわかるように、現実世界並びに交通シミュレーションに比べてモデルでは道路環境、交通環境の各項目で表現できるものが限定されていることがわかる。交通シミュレーションは現実世界の道路構造や交通規制という条件を実態に即して設定することが可能である。

当検証の目的とする現実のインフラ下における規範的避難行動の再現性の確認にあたっては、現実世界に代替えて交通シミュレーションを用いて検証することが可能と考えられる。

表-1 避難計画モデルと比較対象の主な道路条件

	細目	比較対象		避難計画モデル
		現実世界	交通シミュレーション	
道路インフラ条件	車線構成	●	●	
	交通容量	●	●	●
	方向別通行規制	●	●	
	信号制御	●	●	

以上より、モデルで得られた避難行動を交通シミュレーション上で再現し、現実的な道路インフラから受ける影響の有無を検証する。ここで、モデルで得られた避難行動を交通シミュレーション上で再現するとは、モデルで得られた避難行動と同一の需要（出発時刻、利用経路、避難先）を交通シミュレーションに入力することを意味する。

**a) 検証指標**

検証に用いる指標は、避難完了時間を最小とするため、待ち行列を発生させない避難となっているかを確認するため、以下の2指標で評価した。

- 指標1：避難完了時間
- 指標2：リンク走行速度

ここで、各リンクの自由流所要時間以上の旅行時間を要した車両が存在した場合、待ち行列が発生したと判定する。具体的には、各リンクの走行速度について、シミュレーション開始から終了まで10秒間隔に平均し、自由流速度との差分を確認する。

**b) 検証のための比較ケース**

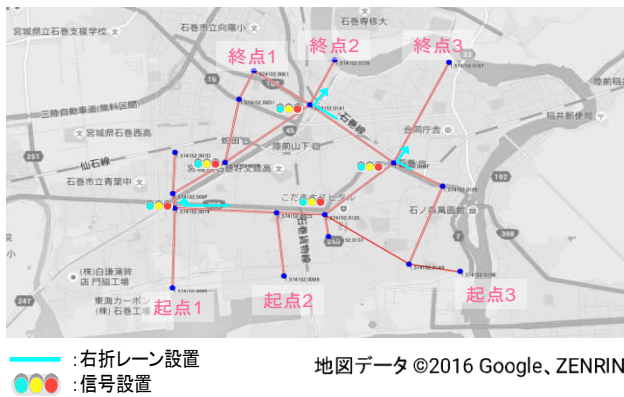
交通シミュレーション上で設定する道路インフラは、避難計画モデルのネットワークをそのまま入力するケース、さらに「車線構成」として右折レーンを追加するケース、または「信号制御」として主要交差点に信号機を追加するケースと、表-2に示す3つのケースを考える。これら3つのケースでのシミュレーション計算結果と避難計画モデルの計算結果を比較検証する。なお、交通シミュレーションは交通流シミュレーターSOUND<sup>®</sup>を用いた。

表-2 モデル妥当性検証のための検証ケース

ケース	車線構成	信号制御	備考
case1	右折レーン無し	信号無し	・同条件での再現ケース ・モデルで得られた行動をシミュレーション上で再現できるか
case2	右折レーン有り	信号無し	・右折レーンによる右折滞留スペースを確保 ・モデルの行動から変化するか ・モデルリンク容量=シミュレーション直進+右折車線の交通容量
case3	右折レーン無し	信号有り	・赤信号による停止状態に伴う影響を確認 ・シミュレーションリンクの交通容量は青現示秒数を考慮し設定

c) 検証に用いるデータ

検証には石巻市を模倣した仮想ネットワーク、避難需要を用意した。データの概要を図-2に示す。



**【道路インフラ】**

- ・リンク数：40， ノード数：18 (起点3・終点3)
- ・道路容量：1車線 720veh/h ・リンク速度：40km/h
- ・避難所容量：1箇所 150veh

**【避難需要】**

- ・避難需要：300台 (各起点から 100台)

※避難計画モデルでは時間軸を  $t=10$  秒と設定

**【交通シミュレーションで設定する条件】**

- ・右折レーン：30m、720veh/h
- ・信号機：サイクル長 80 秒(青 34 秒, 黄 3 秒, 赤 3 秒) オフセット 0 秒。 ※リンク容量は 720veh/青 1 時間

図-2 検証用データの概要

(2) 検証結果

各ケースについて、検証指標1, 2の観点から比較検証を行った。

case1の検証指標1：避難完了時間の評価結果を図-3に示す。当図は縦軸が累積交通量を表し、横軸が計算開始時刻からの経過時間tを表す。破線が出発需要分布を表し、実線が到着需要分布である。当図を見て分かるように交通シミュレーションで計算された出発・到着時刻分布は、避難計画モデルのそれと完全に一致した。検証指標2：リンク走行速度では、交通シミュレーションの各時刻帯(10秒単位)のリンク平均速度を算出し、最も速度が低下した時刻帯の速度と自由流速度(避難計画モデルの設定速度)との差分をとった。結果、当caseではモデルとの速度差は見られなかった。

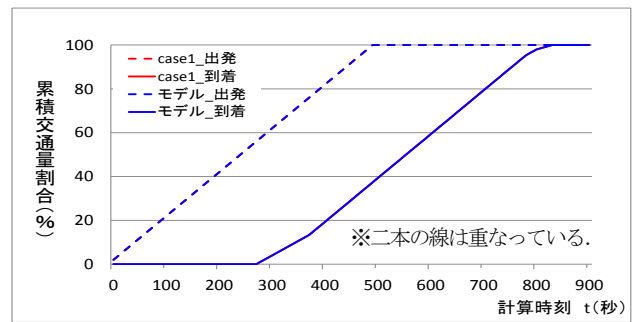


図-3 避難計画モデルとcase1の避難完了時間比較

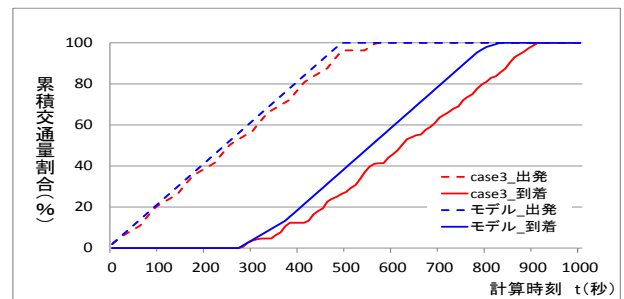
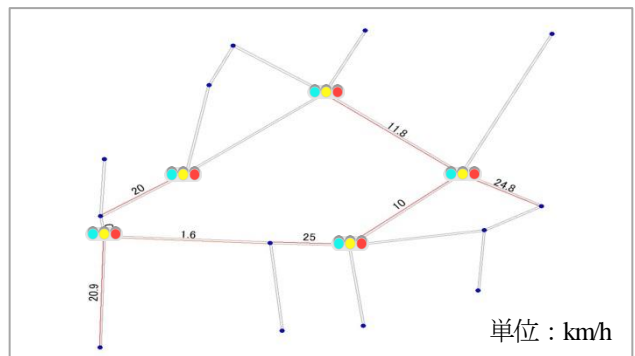


図-4 避難計画モデルとcase3の避難完了時間比較



速度差=自由流速度-リンク平均速度

図-5 避難計画モデルとcase3のリンク走行速度差分図

また、case2は、case1と同様に検証指標1、検証指標2ともに避難計画モデルと完全に一致し、右折レーンによる影響は見られなかった。

続いてcase3は、検証指標1において、信号待ちによる遅れの影響に伴い、避難完了時刻に遅れが80秒ほど生じている(図-4)。検証指標2についても信号交差点への流入リンクにおいて速度低下が見られる(図-5)。

これらの避難遅れの原因を考察すると、case3ではリンク容量を720veh/青1時間と設定していることから信号有無による交通流率の差は無く遅れの原因とはならない。ただし、交通シミュレーション上では車両は現実と同じように物理的な長さを持つことから、赤信号時に交差点への到着需要が720veh/青1時間を超過する場合に待ち行列は延伸する。この停止位置の延伸が遅れを生じさせ時間経過とともに累積するため、避難完了時間に遅れが生じると考えられる。仮にOD需要の一部が、当初経路から別の経路に変更したとしても、別の経路では需要が増加することで街行列が延伸することとなり、避難完了時間はさらに遅れると考えられる。また、出発時刻を後ろに遅らせた場合でも、ある車両の各信号交差点の通過が現在の時刻以上に早まることは無く、避難完了時間としては遅れが生じると考えられる。よって、避難計画モデルから得られる避難行動は赤信号による遅れが生じているものの効率的な行動であると考えられる。

以上のcase1～case3における検証指標1、検証指標2の分析結果から、避難計画モデルで得られた規範的な避難行動は、現実的な道路交通条件下でも再現可能な行動であるものと考えられる。

#### 4. ベンチマークとしての信頼性の検証

前述の検証視点2に示す避難計画モデルのベンチマークとしての信頼性を検証する。信頼性の検証にあたっては、モデルから得られた規範的な避難行動について、「case5 出発時刻」「case6 利用経路」「case7 避難先」の観点で感度分析を行い、モデルから得られた避難行動パターンが避難完了時間を最小とする行動パターンであることを示す。

表-3、図-6、図-7に感度分析ケースの各条件の具体的な設定内容を示す。

##### (1) 出発時刻選択における感度分析

出発時刻選択の感度分析結果を次ページに掲載する図-8に示す。避難計画モデルではt=500秒までに全ての避難者が出発を完了している。そこで、case5-1は100秒早いt=400秒までに避難を完了させるよう、概ね均等に出発時刻を前倒しさせたケースである。逆にcase5-2は100秒

遅い、t=600秒までに避難を完了させるケースである。縦軸が出発交通量、到着交通量の累積割合を示し、横軸が経過秒数である。当図を見ると、避難計画モデルの避難完了時間が最も小さいことがわかる。

表-3 ベンチマーク信頼性検証のための感度分析ケース

行動観点	case番号	分析内容
出発時刻	cas5-1	・出発完了時刻を100秒前倒しするように避難開始時刻を均等に早める。
	cas5-2	・出発完了時刻を100秒後ろ倒しするように避難開始時刻を均等に遅らせる。
利用経路	cas6-1	・起点②から終点③へ経路⑥を利用して向かう避難需要60台のうち5割(30台)を新たな経路⑦に変更する。(図-6)
	cas6-2	・起点②から終点③へ経路⑤を利用して向かう避難需要52台のうち5割(26台)を新たな経路⑧に変更する。(図-6)
避難先	cas7-1	・起点②から終点②へ経路③を利用して向かう避難需要42台のうち21台の避難先を、経路②を利用して終点①に向かうように変更する。(図-7)
	cas7-2	・起点③から終点③へ経路⑥を利用して向かう避難需要60台のうち30台の避難先を、経路④を利用して終点②に向かうように変更する。(図-7)

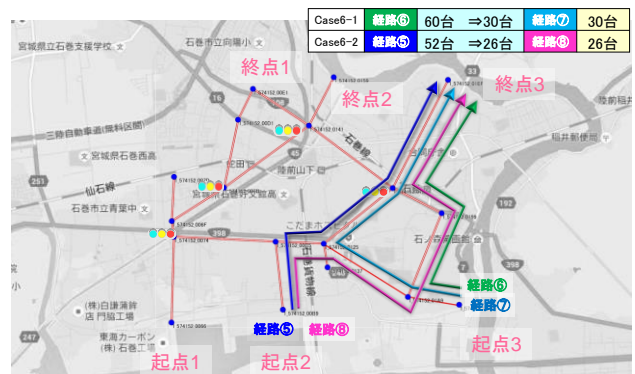


図-6 利用経路の変更

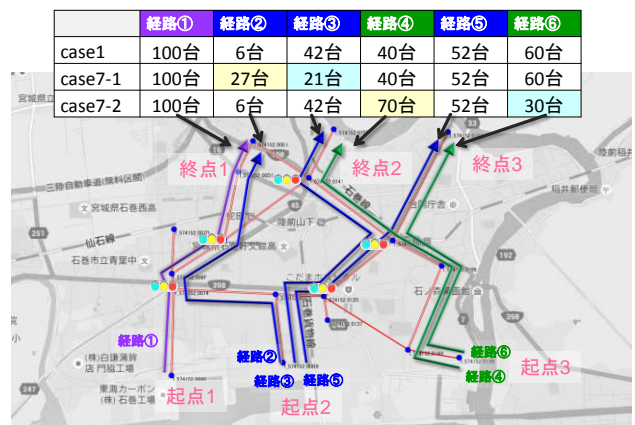


図-7 避難先の変更

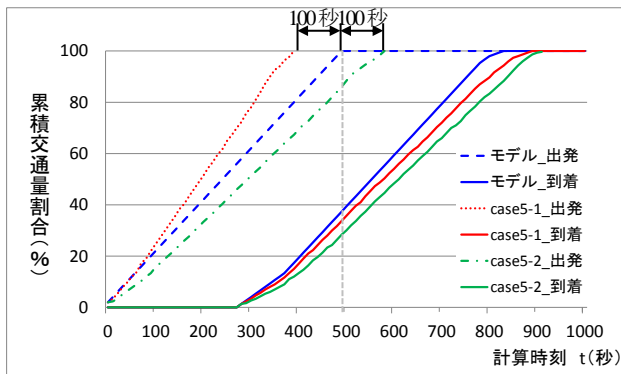


図-8 避難計画モデルとcase5-1, 2の避難完了時間比較

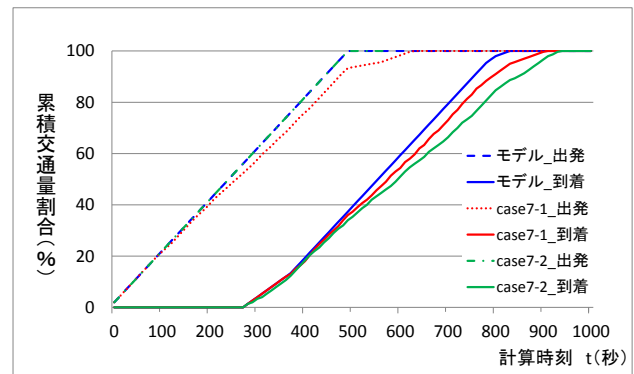


図-10 避難計画モデルとcase7-1, 2の避難完了時間比較

## (2) 利用経路選択における感度分析

まず、避難計画モデルでは起点3箇所から終点3箇所への移動において6つの経路が利用された。図-6の青線で示す経路である。当分析では、モデルで利用された経路ではない別の経路を利用した場合での避難完了時間の変化を確認するものとした。対象としたモデルの経路は経路⑤と経路⑥である。これらの経路を走行する避難需要が別な経路を利用する場合を想定し、case6-1として経路⑥を利用して避難需要の5割が経路⑦に移った場合、case6-2として経路⑤を利用して避難需要の5割が経路⑧に移った場合を考え、それぞれの避難完了時間の変化を分析した。

感度分析結果を図-9に示す。当図を見ると避難計画モデルの避難完了時間が最も小さいことがわかる。

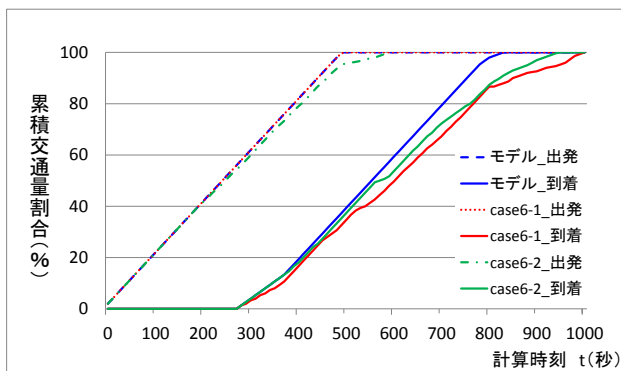


図-9 避難計画モデルとcase6-1, 2の避難完了時間比較

## (3) 避難先選択における感度分析

避難計画モデルでは、図-7に示すように終点1に106台、終点2に82台、終点3に112台が選択した。当分析では、case7-1として終点2を選択した82台のうち21台が終点1に避難先を選択した場合を想定し、case7-2として終点3を選択した112台のうち30台が終点2に避難先を変更した場合を想定するケースである。

各ケースの避難完了時間を図-10に示す。当図を見ると他の感度分析結果と同様に避難計画モデルの避難完了時間が最も小さい結果となっている。

## (4) ベンチマークとしての信頼性に関する考察

(1)～(3)で実施した感度分析結果の示すように、避難計画モデルで得られた規範的避難行動は、いずれの行動観点においても避難完了時間を最小とする行動であることがわかった。すなわち、当モデルで得られた規範的避難行動は、現実の道路インフラを近似する交通シミュレーションにおいても、避難完了時間を最小とする行動を表すものと考えられ、避難行動の観点からのベンチマーク（施策改善の方向性）になりえると考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、これまで取り組んできた規範的な避難行動を仮定する避難計画モデルについて、そのモデルから得られる避難行動が、①現実の道路インフラ上で概ね近く表現できることを確認し、モデルとして妥当性が担保されていることを検証した。また、②モデルから求めたその避難行動が、現実を近似する道路インフラ上においても避難行動の改善方向性を示すベンチマークとなることを、「出発時刻」「利用経路」「避難先」の観点からの感度分析を通じて示した。

これらの検証からは、避難計画モデルから得られる避難行動は、現実の道路ネットワーク空間においても規範性を担保した行動であることが示唆される。このことは、津波被害が予想される地域で、避難渋滞による逃げ遅れという課題について考える際、遅れの原因が避難インフラ側にあるのか、それとも避難行動側にあるのか仕分けることが可能となり、施策検討において重要な情報を得ることができるものである。

一方で、本研究ではベンチマークとしての信頼性について避難行動の観点からのみ検証を行っている。今後は、当モデルの Karush-Kuhn-Tucker 条件から導出される避難インフラの利用価値に着目し、インフラ側の改善方向性についても判断できることを、現実の道路インフラ条件下で検証する必要がある。また、今回の検証では石巻を模倣した仮想ネットワークを用いた。当手法を実規模ネットワークに適用する上では計算コストの問題が課題となる。このような問題に対して、効率的なアルゴリズムの開発や、どこまでデフォルメしたネットワークを用いても信頼できる改善方向性を得ることが可能なのか、ネットワーク密度の許容範囲の検証などを今後の課題とする。

- 2) 安藤宏恵,倉内文孝,杉浦聡志:時空間ネットワークを用いたリンクベース最適避難計画モデルの構築,第 52 回土木計画学研究発表会・講演集,pp.369-377, 2015.
- 3) 加藤直樹, 瀧澤重志:最速避難計画のモデリングと解法. オペレーションズ・リサーチ, 2015 年 8 月号, pp.437-442, 2015.
- 4) So, S.K., Daganzo, C.F., Managing evacuation routes. Transportation Research Part B 44 (2010), 514–520.
- 5) Daganzo, C.F., So, S.K., Managing evacuation networks. Transportation Research Part B 45 (2011), 1424–1432.
- 6) Tohiso Yoshii, SOUND: A Traffic Simulation Model for Oversaturated Traffic Flow on Urban Expressways, WCTR, 1995

(2016.7.31 受付)

#### 参考文献

- 1) 大石雪絵,桑原雅夫,大畑長:規範的避難オペレーションに基づく避難インフラの限界能力評価,第 53 回土木計画学研究発表会・講演集,pp.2553-2560, 2016.

Verifying the applicability of the normative model to physical road network

Takeshi OHATA, KUWAHARA