

# マルチエージェントを適用した被災時救急搬送サービスの 信頼性評価システム\*

柳澤吉保\*<sup>1</sup>・高山純一\*<sup>2</sup>・尾曾真理恵\*<sup>3</sup>

## Evaluation of Travel Time Reliability for Emergency Care Service at the Disaster Area Applying Multi-Agent

YANAGISAWA Yoshiyasu, TAKAYAMA Jun-ichi and OSO Marie

In this paper, evaluation of emergency care service framework is developed to study network reliability applying multi-agent. The choice of route is based on the trade-off between travel time and schedule delay. Agent is renewed the estimated travel time by the day-to-day empirical travel time. The model is used to perform simulation experiments, and to compare the multi-agent method with traditional method. We propose a calculation method of the travel time reliability to the urgent medical institution of an ambulance.

キーワード：マルチエージェント，被災時，救急搬送サービス，信頼性評価システム

### 1. ま え が き

第四次長野市総合計画において、災害に強いまちづくりおよび防災対策の推進が主要政策のひとつとされている。地域防災計画において各種災害に対する予防対策を検討するほか、複雑・多様化する火災や事故などの災害に対して、消防・救急・救助体制の充実が求められている。とくに長野市では「消防や救急救命活動が迅速に行われているか」の間に対して現状は 63.4%であり、目標値から大きく乖離している。長野市の災害発生危険地点に対して、救急車両を迅速に搬送先に搬送するためには、救急拠点の配置とともに最適搬送経路への誘導方法を検討する必要がある。

緊急時の救急拠点配置に関する既往研究として、高山ら<sup>1)</sup>は、時間信頼性による救急搬送サービスの評価法と、救急拠点管轄エリアの最適配置を検討している。緊急時の情報提供方法に関する既往研究として、陶山ら<sup>2)</sup>は、緊急時の交通流動変化を考慮した交通情報の最適空間配置を検討している。ただし、

陶山らも指摘しているように被災時などの緊急には日常的な交通状態から大きく変化することと、救急搬送には、よりシビアに最短経路への誘導が求められることを考慮すると、交通ネットワーク上の経路選択行動に対して、ドライバー個々の主体的意志決定行動を救急搬送問題に組み込む必要があると考えられる<sup>3), 4)</sup>。

そこで本研究では、救急拠点配置および救急搬送車両の経路選択問題にマルチエージェントを適用することを考える<sup>5)</sup>。具体的には、(1)緊急拠点、駆けつけ現場、搬送先を含むモデルネットワークの設定、(2)日常時および被災時の交通行動のシナリオの設定、(3)マルチエージェントシミュレーションを考慮した場合の、最適搬送経路の検討を行い、救急搬送問題の課題を明らかにすることを目的とする。

### 2. 交通ネットワークの設定

本研究における緊急拠点、駆けつけ現場、搬送先を含むモデルネットワークを図 1 に示す。

図 1 に示す起点(セントロイド 1 と 4)から、終点であるセントロイド 15 に向かってトリップが行われているとする。緊急車両は緊急拠点(ノード 5)から出発し、駆けつけ現場(ノード 10 に向かい)、現場から搬送先セントロイド 15 に向かうネットワークとする。トリップは矢印方向のみ行われるとする。す

\* 2008 年度科学研究費補助金の助成を受けて行われた

\*1 環境都市工学科教授

\*2 金沢大学大学院自然科学研究科教授

\*3 長野高専専攻科生産環境システム専攻

原稿受付 2009 年 5 月 20 日

なわち、OD 数は 3 で、OD1, 2 は一般車両、OD3 は救急車両とし、それぞれの経路数は OD 1, 2 では 16、OD 3 では 8 とする。ノード 10 と 11 を連結するリンクが被災リンクとする。

また、被災後時のネットワークは、被災により、被災リンク地点で道路が破損し、通過できない状態となっていることを想定する。したがって救急車両は現場に駆けつけたのち、被災リンクを避け、別のルートで搬送先に向かうものとする。

### 3. 交通行動のモデル化

#### 3-1 交通行動のシナリオ

ドライバーは出発前に目的地までの所要時間損失と、目的地に到着していなければならない時刻に対し、所要時間の持つばらつきによって生じる遅刻確率を考慮した各経路の交通効用を考え、ドライバーが予測した所要時間に基づく交通効用が最も高い経路を選択していると考えられる。さらに、ドライバーは前日までに利用した経路の実所要時間に基づき当日の予測所要時間の更新を行っている。

以上より、一般車両は毎日の学習から、所要時間が長く、所要時間のばらつきが大きい経路を避けて、より最短で所要時間の変動が小さい経路を選択する考えられる。一方、緊急車両は、信号による制限を受けることなく、また一般車両から道をゆずってもらうことができるため、一般車両に比べ、目的地に早く到着することができる。ただし、緊急車両は患者を搬送していない現場までは速く走行できるが、現場から搬送先までは速度を落として走行することになる。さらに、緊急車両はリアルタイムに所要時間情報の提供を受けるものとし、より最短な経路誘導が受けられるものとする。

被災時においては、救急車両は経路変更情報の提供を受けるので、渋滞リンクおよび被災リンクを避けて移動する。しかし、一般車両は情報入手遅れが生じるとし、何台かは被災現場に入り込んでしまい、渋滞に巻き込まれることを想定している。その場合渋滞リンクの長時間の滞留によって目的地までの、所要時間がかかりかかると予想される。

#### 3-2 経路選択行動のモデル化

各 OD  $i$  のドライバーは出発してから個々が予測した目的地までの各経路  $r$  の所要時間に基づいて、その日の利用経路を決定する考えられる。各 OD  $i$  のドライバーは、毎日の繰り返し行動により予測した各経路  $r$  の所要時間  $\tilde{t}_{ir}$  に基づき、時刻  $t_s$  に出

発してから目的地までの所要時間損失と、到着指定時刻  $t_{di}$  に対する早着時間損失または遅着損失確率

により構成され、個々の通勤負効用を最小にする経路  $r$  を選択する考えられる。通勤負効用は、以下のように表す<sup>6)</sup>。

$$V_{ir} = \zeta \cdot (t_{di} - t_s) + \gamma \cdot P(t_{di} < (t_s + \tilde{t}_{ir})) \quad (1)$$

ここで、 $\zeta$  と  $\gamma$  はそれぞれ時間損失および遅刻確率に関する負効用パラメータ、 $(t_s + \tilde{t}_{ir})$  は目的地での到着時刻である。遅着損失確率は以下のように表すことができる。

$$P(t_{di} < (t_s + \tilde{t}_{ir})) = const \int_{t_{di}}^{\infty} \exp((\tilde{t}_{ir} - \bar{t}_{ir}) / \sigma_{ir})^2 d\tilde{t}_{ir} \quad (2)$$

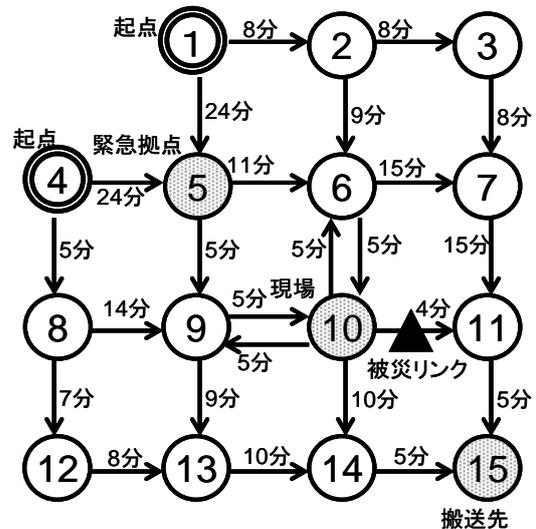
$\sigma_{ir}^2$  は、予測所要時間の分散であり、以下のように予測所要時間と実所要時間との差で表した。

$$\sigma_{ir}^2 = \kappa + (\tilde{t}_{ir} - t_{ir})^2 \quad (3)$$

ここで定数項  $\kappa$  は 2 分とおいた。

#### 3-3 予測所要時間の日々の更新モデル

ドライバーは、予測所要時間に基づいて選択した経路を走行することで得られた実所要時間を考慮し、当該経路の次の日の所要時間の予測を行うと考えられる。具体的には次式のとおり、前日である  $n-1$  日の予測所要時間と実所要時間との差を考慮し、次の日である  $n$  日目の予測所要時間の更新を行うとして、次式のように与えた。



\*リンク脇の数値は自由走行時間  
図1 モデルネットワーク

$$\tilde{t}_{ir,n} = \tilde{t}_{ir,n-1} + \omega(t_{ir,n} - \tilde{t}_{ir,n-1}) \quad (4)$$

ここで、 $\omega$ は予測所要時間更新量に対する重みである。

#### 4. マルチエージェント (M. A) を適用した交通行動シミュレーションの構築

##### 4-1 交通行動モデルへの M. A の適用

先に述べたとおり、被災時を対象とした大きな交通状態の変動が生じる事象を対象とすること、交通状態の変動による被災現場および救急搬送先への到着遅れなどのリスクを考慮した最短経路への誘導が求められることを考慮すると、交通ネットワーク上の経路選択行動に対して、ドライバー個々の主体的意志決定行動を救急搬送問題に組み込む必要があると考えられる<sup>3),5)</sup>。そこで、本研究の交通モデルにマルチエージェントを適用するが、所要時間の予測や経路などの意思決定に用いる行動規範ルールはエージェント間で差はなく、時間損失や遅刻ペナルティ、および新たに入手した情報に対する重みがエージェント間で異なるとした。従って、個人番号を  $k$  とすると、通勤負効用は以下のとおりである。

$$V_{k,ir} = \zeta_k \cdot (t_{di} - t_s) + \gamma_k \cdot P(t_{di} < (t_s + \tilde{t}_{ir})) \quad (5)$$

また、予測所要時間の更新モデルは以下のとおりである。

$$\tilde{t}_{k,ir,n} = \tilde{t}_{k,ir,n-1} + \omega_k(t_{k,ir,n} - \tilde{t}_{k,ir,n-1}) \quad (6)$$

式(5)、(6)のパラメータ  $\zeta_k$ 、 $\gamma_k$ 、 $\omega_k$ は、個々のエージェントごとに与える。

##### 4-2 交通行動シミュレーション

本交通行動シミュレーションを構成するサブシステムは以下のとおりである。

###### ①モデルネットワークにおける経路交通量の

###### 初期状態の作成

IA法により、初期状態を作成する。リンク  $a$  所要時間には以下に示すBPR関数を与えた。 $V_a$ はリンク  $a$  の交通量。 $C_a$ はリンク  $a$  の交通容量。 $\alpha$ は 0.15、 $\beta$ は 4 とした。

$$t_a = t_{a0} \times \{1.0 + \alpha \left(\frac{V_a}{C_a}\right)^\beta\} \quad (7)$$

###### ②M. E 法を適用しない場合の交通状態の再現

初期状態のネットワークにおいて、OD交通の *day-to-day* 繰り返し行動を収束するまで行う。経路  $r$  の選択確率は、式(8)のロジットモデルで与えた。経

路選択効用関数  $V_{ir}$ は、式(1)を用いる。

$$p_{ir} = \frac{\exp V_{ir}}{\sum_{j=1}^n \exp V_{jr}} \quad (8)$$

被災時には、収束状態後に被災リンクを通行止めとして、シミュレーションを1回のみ行う。

###### ③M. A 法を適用した場合の交通状態の再現

初期状態のネットワークにおいて、マルチエージェント (M. A) を考慮した *day-to-day* の繰り返し行動を収束するまで行う。各M. Aの経路選択行動および予測所要時間の更新は、サブシステム②に従うものとする。係数  $\zeta_k$ 、 $\gamma_k$  および更新係数  $\omega_k$  は、個々のエージェントごとに値を与えた。ただし、それぞれの平均値は②で与えた  $\zeta$ 、 $\gamma$  および  $\omega$  と一致させた。

###### ④救急車両走行関数

ここでは、②および③で得られた経路選択状態のもとで、救急車両の緊急拠点から救急現場、救急現場から搬送先までの各経路所要時間を比較し、最短経路を探索する。救急車両のBPR関数については、高山ら<sup>1)</sup>の研究成果を用い、式(5)のリンクBPR関数について、現場までの  $\eta$  を 0.35、現場から搬送先までの  $\eta$  を 0.7 とした。

$$t_a = t_{a0} \times \{1.0 + \eta \cdot \alpha \left(\frac{V_a}{C_a}\right)^\beta\} \quad (9)$$

### 5. 時間信頼性評価指標

被災時の救急車両の搬送には、救急現場あるいは搬送先までの最短経路探索だけではなく、所要時間が大きく変動することを考慮し、目的地までの到達確率も議論する必要がある。交通ネットワークにおいて、所定の時間内で目的地に到達できる確率として時間信頼性がある<sup>2),3)</sup>。

経路交通量が正規分布に従うとすると、経路の所要時間も正規分布に従う。ここで、 $\bar{t}_r$  は経路  $r$  の平均所要時間、 $\sigma_r^2$  は経路  $r$  の所要時間の分散である。また、経路  $r$  における所要時間を  $t_r$  とすると、この正規分布の確率密度関数は次式で表される。

$$f(t_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_r}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t_r - \bar{t}_r}{\sigma_r}\right)^2\right] \quad (10)$$

経路の時間信頼性は、確率密度関数に対する所定の閾値以下の面積で与えられる。所要時間信頼性の閾値を  $t_r^*$  とすると、経路の時間信頼性は以下の式に

より計算することになる。

$$\Pr\{t_r \leq t_r^*\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \int_{-\infty}^{t_r^*} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t_r - \bar{t}_r}{\sigma_r}\right)^2\right]$$

ここで、 $t_r^*$ は 20 分と設定した。

### 5. 数値実験

#### 5-1 交通条件の設定

基本的交通条件の設定を表 1 に示す。

エージェント数は一般車両合計で 200 台とし、その中に 1 台の緊急車両が走行しているとする。通勤負効用関数と予測所要時間更新に関する学習の重みは表 1 の基準値を平均値として、エージェントごとに等間隔でそれぞれパラメータ値を与えた。遅刻ペナルティの重みは、時間損失の約 3 倍の大きさを与えた。前章述べた時間信頼性の閾値は 20 分とした。

#### 5-2 ケースの設定

ここでは、最短経路探索結果と信頼性結果について示す。はじめに、以下の 4 つケースを示す。

- (1) 通常時の場合
  - ①M.A を適用していないケース
  - ②M.A を適用したケース
- (2) 被災時の場合
  - ③M.A を適用していないケース
  - ④M.A を適用したケース

(1)の通常時の場合では、災害が発生していない場合で、日常的な交通行動が行われているとする。(2)の被災時の場合は、ノード 10 から 11 に向かうリンクが通行止めになる場合である。いずれのケースもさらにマルチエージェントを適用する場合と適用しない場合を設定し、比較する。

#### 5-3 数値実験結果

##### (1)通常時の場合

##### ①M.A を適用していないケース

一般車両と緊急車両の最短経路を見てみると、いずれの OD に対しても違うルートが最短経路になっていることがわかる。OD1 および 2 の最短経路は多くの交通量が集中していると考えられ、それを避けるように救急車両の最短経路が出現しているものと考えられる。

一般車両、緊急車両共に、マルチエージェントの適用の有無では最短経路に大きな変化が生じていることが分かる。OD2 の最短経路が 2 経路現れた。

表 1 交通条件の設定

エージェント数 [交通量] (台)	OD1(一般車両)	100
	OD2(一般車両)	100
	OD3(緊急車両)	1
リンクBPR関数パラメータ	$\alpha = 0.15$	
	$\beta = 4.00$	
	$\xi = -0.06$	
	$\gamma = -0.15$	
効用関数パラメータ	一般車両	$\eta = 1$
	緊急車両(現場まで)	$\eta = 0.35$
	緊急車両(搬送先まで)	$\eta = 0.70$
学習の重み $[\omega]$	0.400	
交通量の収束条件	10.00	

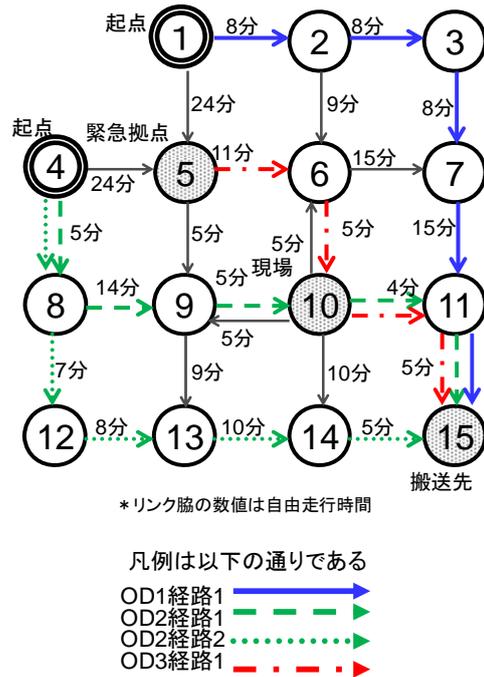


図 2 通常時に M.A を適用していない最短経路

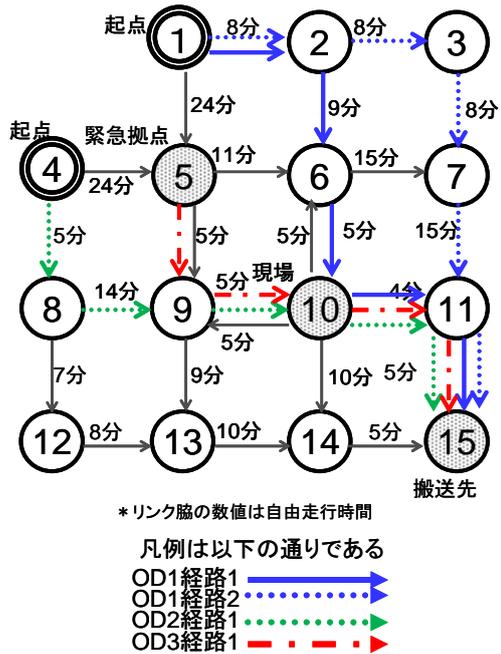


図 3 通常時の M.A を適用した最短経路

M.A を適用した場合、OD1 の最短経路が前ケースの救急車両最短経路の構成リンクと重複したため、救急車両の最短経路が変更されていることがわかる。

(2)被災時の場合

③M.A を適用していないケース

ここでも、緊急車両の最短経路は一般車両の最短経路を避けるように現れている。緊急車両の最短経路は、ケース①と比較し、被災リンク直前で回避しているのが分かる。

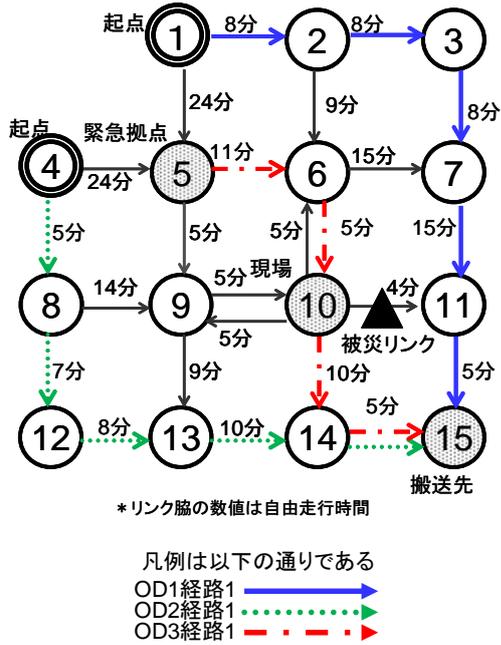


図4 被災時の M.A を適用していない最短経路

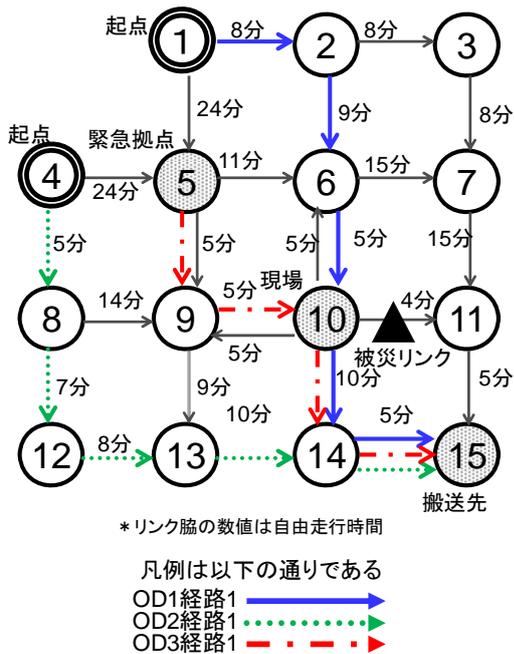


図5 被災時の M.A を適用した最短経路

④マルチエージェントを適用したケース

被災時も、マルチエージェントの適応の有無で最短経路が大きく変更された。マルチエージェントを適応していない場合は被災リンクの直前で経路変更を行っているが、マルチエージェントを適用している場合には、さらに一つ前の地点で経路変更していることが分かる。

マルチエージェントの適用の有無で緊急車両の最短経路の所要時間に大きな違いが表れていることがわかる。通常時では42分、被災時では21分であった。これは、マルチエージェントを考慮した場合は、個々の意思決定に大きな違いが表れ、ひとつの経路に集中することなく、経路選択に大きなばらつきが出たためだと考えられる。一般に、ドライバーは日々の学習からひとつの経路の集中することがないので、マルチエージェントを適応したモデルは適用していないモデルと比べ、より実際の行動に近い状態を再現できると期待できる。

つぎに時間信頼性評価（到達確率）を図6で検討する。表2に各ケースの最短経路の所要時間を示す。

表2 各ケースの最短経路の所要時間

	マルチエージェントを適用していない場合			マルチエージェントを適用した場合		
	OD1 (一般車両)	OD2 (一般車両)	OD3 (緊急車両)	OD1 (一般車両)	OD2 (一般車両)	OD3 (緊急車両)
通常時	39分	36分	41分	41分	35分	19分
被災時	40分	36分	42分	41分	39分	21分

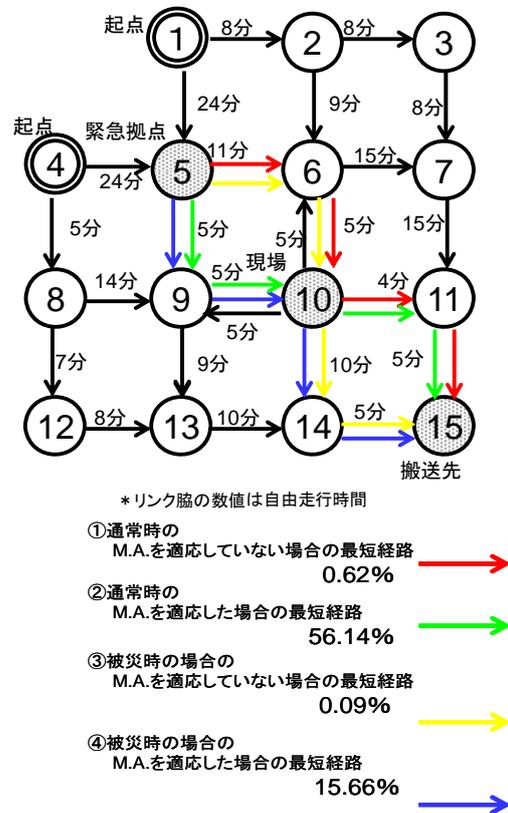


図6 時間信頼性評価結果

ここでは、時間信頼性を経路図と共に示した。緊急車両のみ時間信頼性評価を示した。

マルチエージェントを考慮しない場合は、特定の経路に交通量が集中する傾向があるため、到達確率が極めて低いことがわかる。しかしながら、M.Aを適用したときの最短経路では、信頼性は56%と向上したことがわかる。

## 5. 結論

本研究で得られた成果を次に示す。

(1)数値実験においてマルチエージェントの適用の有無に関する比較・検討を行った。その結果、

マルチエージェントの適応の有無では、経路選択に大きな差が生じた。そのなかでも、適応の有無で、所要時間は20分近くも差がでてしまった。マルチエージェントは、エージェントどうしが1つのリンクに集中することなく、個人の情報収集の経過によって経路選択に大きなばらつきが生じたためだと考えられる。

(2)時間信頼性評価を行った結果、時間信頼性指標では、マルチエージェントでの最短経路でも信頼性は56%だった。

緊急車両の経路誘導は平均所要時間だけではなく、時間信頼性も考慮に入れた緊急拠点を検討する必要があることが分かった。

(3)問題提起と今後の展望

①マルチエージェント適用の有無で最短経路の所要時間に大きな差が出た。前章の結果にもあるが、通常時の所要時間を見てみると、マルチエージェントを適応していない場合の緊急車両の最短経路の所要時間が41分であるのに対し、マルチエージェントを適用した場合での緊急車両の最短経路の所要時間は19分と、22分の差が出た。これは、マルチエージェントはひとつの経路に集中することなく、個人の情報収集の経過から経路選択にばらつきが見られたためと考えられる。一般にドライバーは毎日の学習から、所要時間のばらつきが大きい経路は選ばないと考えられる。よって、マルチエージェントはこの点においてより実際の交通現象を再現していると考えられる。さらに実際の行動を再現できるマルチ

エージェントのモデルを構築することで、実際の問題にも対応できるようにする。そのために、時刻に対して静的なモデルから動的なモデルへの変更、リンク、ノード数を増やすなどの工夫が必要である。

②緊急車両の経路誘導は平均所要時間だけではなく時間信頼性も考慮に入れた緊急拠点を検討する。時間信頼性の結果は、最短経路の中でも最も所要時間の短い経路において、56%と半分の確率でしか到達できない結果となった。最短経路の中で最も所要時間の短い経路はの所要時間は19分と、目標到達時間である20分以内に収まっているケースもあった。

救急車両は特に、搬送時間も重要となる。より早く、目的地まで確実に搬送することが重要なので、緊急車両の経路誘導には、所要時間が早いものだけでなく、時間信頼性も考慮に入れた緊急拠点配置および搬送先を検討する必要がある。

## 参考文献

- 1) 高山、黒田：救急車の走行時間信頼性からみた救急拠点の最適配置に関する研究、都市計画論文集、pp.595-600、2000.10
- 2) 陶山、秋山、奥嶋：都市道路網における緊急時交通情報提供の効率的運用に関する検討、第23回交通工学研究発表会、論文報告集、pp.201-204、2003.10
- 3) 佐藤達生：経路・出発時刻同時選択を考慮した適応的マルチエージェントによる交通システムモデルに関する研究、(2005.1)、金沢大学大学院修士論文
- 4) 根岸祥人、加賀屋誠一、内田賢悦、萩原亨：マルチエージェント・シミュレーションを用いた震災時非難の交通行動に関する研究
- 5) 柳沢、高山、廣川：マルチエージェントを適用したネットワーク信頼性評価のための交通行動モデルの構築、長野高専紀要 Vol. 42、ウェブ版、2008.6
- 6) 柳沢吉保、高山純一、中沢伸樹、飯田恭敬：信号交差点と情報提供を考慮した日々の動的ネットワークフロー評価システム、土木計画学研究・講演集 No23(2)、(2000)pp.367-370.