交通シミュレーションを活用した 都市高速道路上の救命活動支援に関する一考察[†]

山 脇 正 嗣* 白 木 渡**
井 面 仁 志** 保 田 敬 一***

A Study on Lifesaving Activity on Urban Expressway Network by Traffic Simulation

by

Masashi YAMAWAKI*, Wataru SHIRAKI**, Hitoshi INOMO** and Keiichi YASUDA***

When traffic accident occurs on urban expressway network, lifesaving activity with emergency car is important that promptly executes arrival at the scene of the accident and transportation to a hospital. The execution of the lifesaving activity requires a lot of time by the cause such as traffic jam after accident occurs. Therefore, the fire fighting organization and the urban expressway organization should examine method of executing prompt the lifesaving activity even when traffic jam occurred by frequently executing the lifesaving training that assumes situation when the accident occurs. However, it is difficult on both sides of time and the cost to actually execute lifesaving activity in urban expressway. Then, in this study, we examined prompt lifesaving activity in urban expressway by using the traffic simulation system developed by authors. Specifically, by reproducing situation that the traffic accident occurs on urban expressway and the lifesaving activity executes with the system, we measured the arrival time that emergency car arrives at the scene of the accident. And, we examined the expected lifesaving effects by using the concept of Golden Hour Principle that shows relation between passage time since the injury and mortality rate, we made the problem of the present lifesaving activity clear. In addition, we proved that a lifesaving possibility improved by shortening time that the emergency car enters in the expressway.

Key words : Traffic simulation, Urban expressway, Traffic accident, Rescue activity, Golden hour principle

1 緒 言

高速道路は一般道路よりも速度制限が緩和されているため、追突事故等の自動車事故が発生した場合、受傷者は高エネルギー外傷を受け、死亡率が一般道路の事故発生時よりも高くなる。そのため、事故発生後に受傷者をいかに早く救急病院まで搬送するかが、救命活動を行う上で重要になる。高速道路における迅速な救命活動の一つとしてドクターヘリコプターの利用が挙げられる。日本においては、1990年代から実験運航が行われ、その有効性が確かめられてからは、各医療機関や消防機関において導入が進められている。¹⁾しかし、高額な運搬費用、十分な数の医師の確保、ヘリポートの不足等、解決しなければならない課題が多数存在するため、全国的な導入には至っていない。²⁾また、地方高速道路よりも遥かに交通量の多い大都市圏の都市高速道路においては、事故発生後に大規模な渋滞発生が予測されるため、離着陸場所の確保の困難さから、ドクターヘリコプターによる救命活動の実施は一層困難である。³⁾

そこで、都市高速道路における事故発生時には、救急車両による救命活動を優先し、事故現場への到着から、病院への搬送を迅速に行うことが重要である。しかし、

前述の渋滞の問題点等から救命活動の実施は時間を要すると考えられるため、各消防機関や都市高速道路機関は、常日頃から事故発生時を想定した救命訓練を実施し、渋滞時における迅速な救命活動の実施方法を検討しておく必要がある。しかし、都市高速道路において実際に救命訓練の実施は時間的にもコスト的にも困難である。救命訓練を実施することなく、迅速な救命活動の実施方法を検討する手法の一つとして、コンピュータ上で車両の交通行動を再現する交通シミュレーションによるアプローチが考えられる。シミュレーションでは、様々な事故発生状況と救命活動の実施状況を想定・再現する事が可能であり、実際の救命訓練では実施不可能な自動車事故の発生を想定できるメリットがある。

近年では、都市道路網を対象に車両の交通行動を再現するシミュレーションについて数多くの研究開発が行われている。例として、堀口らによる AVENUE⁴⁾、飯田らによる SATURN⁵⁾等があり、交通渋滞対策や都市計画の分野に利用されている。また、関西圏の大動脈である阪神高速道路においても、奥嶋らによる HEROINE⁶⁾が、実際の交通管制業務や道路保全等に活用されている。しかし、自動車事故の発生と救急車両の走行を再現し、都市高速道路

[†] 原稿受理 平成 23 年 6 月 1 日 Received June 1, 2011 © 2012 The Society of Materials Science, Japan

* 学生会員 香川大学大学院工学研究科 〒761-0396 高松市林町, Graduate school of Eng., Kagawa Univ., Hyashi-cho, Takamatsu, 761-0396

** 正 会 員 香川大学工学部信頼性情報システム工学科 〒761-0396 高松市林町, Dept. of Reliability-based Information Systems Eng., Kagawa Univ., Hyashi-cho, Takamatsu, 761-0396

*** 正 会 員 (株) NEWJEC 道路グループ 〒531-0074 大阪市北区本庄東, NEWJEC Inc., Kita-ku, Osaka, 531-0074

の迅速な救命活動の検討を行うためにシミュレーションを利用した研究については見当たらないのが現状である。

そこで本研究では、著者らが開発を進めている交通シミュレーションシステム^{7), 8)}を用いて、都市高速道路を対象とした救急車両による迅速な救命活動の実施方法について検討する。具体的には、実際の阪神高速道路を対象に、システムを用いて救命活動の実施状況を再現し、救急隊員による救命措置の開始時間を計測することで、救命措置の開始を遅らせる要因を特定する。さらに、受傷後の経過時間と死亡率の関係を示すカーラーの救命曲線の概念を用いて、期待される救命効果について検討する。以上より、現状の救命活動の問題点を明確化し、改善策についての提言を行う事を研究目的とする。

2 交通シミュレーションシステム

著者らが開発を進めているシミュレーションシステムでは、既存の避難シミュレーションに関する研究で主に利用されている MAS (Multi-Agent System)⁹⁾の考え方を採用して、阪神高速道路を対象に、通常時と被災時におけるドライバーの心理と行動特性を考慮した車両の交通行動が再現可能である。また、高速道路管理者による防災・減災計画構築の支援を行うために、システムには事故車両・道路破損等の災害の発生、避難誘導・救命活動等の被災時対応策の実施状況を再現する機能を実装し、対応策の効果と有効性を容易に確認可能にしている。以下にシステムの主な機能を示す。

- 車両の行動を可視化することにより容易に行動の傾向や特徴を把握できる。
- 残存車両数や経過時間等がシステム画面上に数値で表示されるので、刻一刻と変化する状況を定量的に判断できる。
- 様々な状況変化を想定した被災時対応策を検討可能にするため、シミュレーションの途中においても、シミュレーション環境やエージェントの行動規則等を容易に変更できる。

2・1 対象環境

本システムでは阪神高速道路 1 号環状線をシミュレーション対象環境として設定している。1 号環状線は各路線を連結する役割を担う重要路線であり、路線内は右回りの一方通行となっている。また、阪神高速道路を利用する車両の約 50% が集中するため、渋滞の発生が常態化している状況にある。そのため、自動車事故や道路破損等の災害が生じた場合には大規模な渋滞が発生し、受傷者の救助を行う救急車両の走行を妨害すると予測されている。

シミュレーション環境を設定するに当たり、環状線内 (Fig. 2 (a)) の狭域空間と環状線外の道路領域 (Fig. 2 (b)) の広域空間の 2 種類の空間を考慮する。環状線内の個々の車両の詳細な行動を再現する狭域空間と、環状線外の車両の交通行動を巨視的に再現する広域空間の、スケールの異なる 2 種類の空間を相互リンクさせることで、広範囲の被災状況を再現可能にしている。また、シミュレーション環境における交通量、各流出ランプ付近の信

Fig. 1 Traffic simulation system.

Fig. 2 Two kinds of simulation environment.

号制御パラメータ等については、阪神高速道路の平成 16 年 4 月の交通データと実地調査に基づき設定している。

2・2 シミュレーションモデル

1) 狭域空間の設定

狭域空間である環状線内では、高速道路を走行する車両エージェントを、「普通車両」、「大型車両」、「緊急車両」の 3 種類に分類する。各車両エージェントは、自身の視野範囲内の環境を確認した上で、時間 t から時間 $t+1$ の間に、設定した行動規則に従い、走行環境に応じた最速の速度を選択し移動する。ただし、本シミュレーションモデルにおける 1 ステップは実時間の 2 秒と設定している。各エージェントの具体的な行動規則については参考文献^{7), 8)}を参照して頂きたい。

2) 広域空間の設定

環状線外の広域空間において個々の車両の行動を再現することは、シミュレーション効率や計算機への負荷等の面から非常に困難である。そこで本研究では、広域空間を構成する各道路領域を、複数の車両が存在する道路領域エージェントとして設定することで、少ない計算量で広域空間における大規模な交通行動を再現する。各道路領域エージェントは、自身の状態と、周囲のエージェントの状態を確認したうえで、狭域空間における車両エージェントの行動規則に基づき決定し、状態を遷移させる。

2・3 シミュレーションシステムの精度確認

シミュレーションシステムの精度を確認するために、実際の車両事故による渋滞現象と本研究で提案するシミュレーションシステムを用いた結果を比較する。比較対象とする現象としては、平成 17 年 3 月 17 日 (木) に 1 号環状線 1.1 キロポスト (以下 kp と表示) 地点付近で発生した 5 台が関係する追突事故による渋滞現象¹⁰⁾を選択し、システムを用いて同じ現象を再現する。シミュレーションの設定条件を以下に示す。

- ・ 事故車両の発生：シミュレーション開始と同時に
- ・ 事故車両発生箇所と通行状態：1 号環状線 1.1kp 地点の 4 車線の内、左側 2 車線が 1 時間通行不能の状態
- ・ 車両混入率：普通車 95%・大型車 5%
- ・ 初期車両エージェント数：2000 台

実際の渋滞現象の状況を Fig. 3、シミュレーション結果を Fig. 4 に示す。Fig. 3 より、事故発生から約 1 時間後に 2 車線の交通規制を実施した結果、事故現場を先頭とする渋滞が環状線を越え、14 号松原線、15 号堺線の各路線で渋滞現象が発生していることが分かる。Fig. 4 のシミュレーション結果においても、Fig. 3 と同等の結果が得られており、シミュレーションシステムが実際の渋滞現象を精度良く再現できていることが確認できる。

3 シミュレーションによる救命活動の検討

3・1 救命活動概要

本研究で想定する救命活動の概要を Fig. 5 に示す。まず、自動車事故発生後に発見者による携帯電話等を用いた連絡が、Fig. 6 に示す環状線付近の 7 つの消防機関の何れかに入る。連絡を受けた消防機関から救急車両が出動し、最寄りの流入ランプから高速道路へ進入する。高速道路上を走行し、事故発生現場に到着する。そして、救急車両に乗車していた救急隊員による救命措置が開始されるものとする。

3・2 救命活動検討シミュレーション

上記の救命活動をシミュレーションシステムで再現し、事故発生から救命措置開始時間を、現状の救命活動の問題点と改善策について検討する。なお、救命措置の開始

Fig. 3 Real traffic jam phenomenon.

(a) Loop Route

(b) Outside Loop Route

Fig. 4 Simulation result.

Fig. 5 Concept of lifesaving activity.

は事故現場へ到着後直ちに開始されるものとする。被災状況と救命活動の実施状況を再現する際には、以下に示す各車両の行動規則とシミュレーションの初期条件を設定し、救命措置の開始時間 T_E を計測する。

1) 救急車両の行動規則

救急車両の行動規則を以下に示す。

- ・ 道路交通法における緊急車両の最高制限速度である 100km/h までの速度で移動する。
- ・ 事故車両の 5m 以内に接近した場合には、停止して救命活動を行う。
- ・ 高速道路の逆走については、ほとんどの消防機関において禁止しているため考慮しない。³⁾
- ・ 消防機関への連絡時間と一般道路の走行時間を考慮

Fig. 6 Positional relationship of fire stations and entry ramps.

し、環状線への流入時間を本論文では事故発生から 10 分後と仮定する。

2) 普通・大型車両の行動規則

普通・大型車両の行動規則を以下に示す。

- ・阪神高速道路の最高制限速度である 80km/h までの速度で移動する。
- ・ドライバーの多くは、走行中に視野内に事故車両を確認した場合、危険を察知したり、関心を持ったりすることにより走行速度を低下させる^{7), 8)}したがって、視野範囲内に事故車両を確認した場合、30km/h までの徐行速度で移動する。

3) シミュレーション初期条件

以下にシミュレーションの初期条件を示す。

- ・事故発生時刻：シミュレーション開始と同時に

- ・事故内容：環状線の 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7kp 地点の何れか 1 箇所で自動車事故が発生し、1 車線が通行不可能になった状態を想定
- ・通行不可能車線：ランダムに決定
- ・車両混入率：普通車 95%・大型車 5%
- ・初期車両エージェント数：3000 台
- ・時間帯：交通量の多い夕方時を想定
- ・平均流入車両数：1200 台/h
- ・2 次災害の発生：考慮しない
- ・シミュレーション回数：30 回

3・3 シミュレーション結果

シミュレーション結果として、Fig. 7 に T_E の平均値と標準偏差を示す。Fig. 7 では、事故が発生した kp 地点別 (Fig. 7 (a))、救急車両が流入した流入ランプ別 (Fig. 7 (b)) で T_E の平均値と標準偏差を表示している。

Fig. 7 (a), Fig. 7 (b) より、全体として 30 ~ 40 分程度で救命措置が開始されていることが分かる。しかし、1kp 地点において事故が発生した場合については、 T_E の値が他の地点よりも 10 分程大きくなっていることが Fig. 7 (a) より確認できる。シミュレーション実行状況を確認したところ、Fig. 8 の 1 車線の道路区間において大規模な渋滞が発生し、救急車両の走行を妨害することが原因であった。特に、救急車両が高津流入ランプから高速道路へ流入した場合は、現場に到着するために必ずこの地点を走行する必要があるため、 T_E の値が他よりも大幅に大きくなることが、Fig. 7 (b) から確認できる。一方で、湊町流入ランプから流入した場合では、この地点を走行する必要が無いため、 T_E の値が他よりも小さくなっていることも Fig. 7 (b) から確認できる。以上より、環状線で事故が発生した状況においては、Fig. 8 の 1 車線区間が渋滞を発生させるボトルネック地点となり、救急車両の走行を妨害し、救命措置の開始を遅らせる原因になると考えられる。

また、Fig. 7 より、救命措置の開始には少なくとも約 28 分を要することが分かる。総務省消防庁によると、平成 21 年の救急車両の事故現場到着時間は全国平均で 7.9 分¹⁾であり、それと比較すると、今回のシミュレーションでは事故現場の到着に非常に時間が掛っていることが確認できる。シミュレーションの実行状況を確認したところ、救急車両が高速道路に流入するまでの 10 分間に

(a) Each kp point

(b) Each enter ramp

Fig. 7 Mean value and standard deviation of T_E without running support of ambulance.

Fig. 8 Road section of one lane.

発生した渋滞により、救急車両の走行速度が低下することがその原因であった。そこで、救急車両の走行速度を低下させないために、普通・大型車両が視野範囲内に救急車両を確認した場合、救急車両が走行する車線を避けて移動する行動規則を新たに設定したシミュレーションを実施し、設定前と比較して T_E の値がどの程度低下するのかについて検証した。そのシミュレーション結果として、Fig. 9 に T_E の計測結果を示す。

Fig. 9 (a), Fig. 9 (b)の結果より、 T_E の値は Fig. 7 と比較して約 10 分低下し、普通・大型車両が救急車両の走行を支援しない場合よりも迅速な救命活動が実施可能になることが確認できる。この結果から、実際の事故発生時においてもドライバーが、シミュレーションにおける普通・大型車両と同様に救急車両の走行支援を行うと、渋滞している高速道路においても、救急車両は迅速に現場に到着できると考えられる。したがって、事故発生時には、救急車両用の道路を確保することが重要であり、そのための手順・方法を検討しておく必要がある。また、日頃から救急車両が走行してきた場合の走行支援方法ならびにその効果を道路情報掲示板や都市高速道路事業のホームページ等において事前に周知しておくことが、迅速な救命活動を行う上で重要である。

3・4 救命可能性の検証

本節では、Fig. 9 のシミュレーション結果に基づき、特定の傷を受けた受傷者に対する救命措置により、受傷者の救命可能性がどの程度存在するのかについて検討する。

Fig. 10 に事故等による受傷からの経過時間と死亡率の関係を概念的に表す図として、1981 年にフランスの救

- ① Mortality rate after about 3 minutes of cardiac arrest is 50%.
- ② Mortality rate after about 10 minutes of respiratory arrest is 50%.
- ③ Mortality rate after about 30 minutes of excessive bleeding is 50%.

Fig. 10 Golden Hour Principle.¹⁾

急専門医師である M. Cara によって報告された「カーラーの救命曲線」¹⁾を示す。カーラーの救命曲線は、日本で行われている応急手当講習会においても、救命可能性の理論的根拠となっている。Fig. 10 に示されている死亡率において、受傷者が多量出血の場合、受傷から 15 分経過すると死亡率が徐々に上昇し、約 1 時間後には死亡率が 100% となり、ほとんど救命の可能性を失うことが分かる。ここで、30 回ずつの各シミュレーションにより計測した T_E の値から、多量出血の救命曲線よりも以前（事故発生から 15 分未満）に救命措置の機会を得る受傷者は重傷、以後（15 分以上）となる受傷者は死亡となると仮定し、受傷者の重傷率と死亡率を算出した結果を Fig. 11 に示す。

Fig. 11 (a) より、2・3・4・6・7kp 地点で事故が発生した場合のみ救命可能性が存在していることが分かる。これらの地点は 2 車線以上の道路区間、分岐路が近くに存在する等の理由から、渋滞が他の地点よりも発生しにくいと考えられる。ただし、Fig. 11 (b) より救命可能性の存在する地点においても高津流入ランプから侵入した場合は、救命可能性がなくなることがわかる。また、救命措置の開始に時間を要する高津流入ランプ以外から流入した場合には救命可能性が存在することが Fig. 11 の結果より確認できるが、救命可能性は、すべての場合において 30% 以下であり、事故発生から 10 分経過後に救急車両が高速道路へ流入した場合では、受傷者の救命可能性は限りなく低くなることが予測できる。

(a) Each kp point

(b) Each enter ramp

Fig. 9 Mean value and standard deviation of T_E with running support of ambulance.

(a) Each kp point

(b) Each enter ramp

Fig. 11 Expected lifesaving effect with running support of ambulance.

4 救急車両の流入時間短縮による救命率向上の検証

近年, ITS (Intelligent Transportation Systems) 技術の高度化に伴い, 阪神高速道路においても交通センサや高速道路監視カメラが多数設置され, 事故発生時における被災状況の迅速な把握と, 他機関への情報連絡が可能になっている。救命活動においても, 事故発生後の消防機関への連絡が速い程, 救急車両の現場への到着時間が速くなり, 救命可能性も向上すると考えられるが, それが実証された例は存在しない。そこで本章では, 事故発生から救急車両が高速道路へ流入するまでの時間を短縮化し, 前節よりも5分早く流入した場合の T_E の計測と救命可能性の検討を行い, 前節で実施したシミュレーション結果と比較し, 迅速な事故状況把握と情報伝達による救命可能性の向上について検証した。Fig. 12 に T_E の計測結果, Fig. 13 にカーラー曲線による救命可能性を示す。

Fig. 12 (a), Fig. 12 (b)の結果より, T_E の値は改善前と比較して最大10分程, 最小でも3分程低下していることが分かる。1車線の道路区間を走行する必要がある高津流入ランプから流入した場合の救命活動についても, 改善前よりもその区間の渋滞が小規模であったため, 走行時間が短縮し, 約20分で救命措置を行えることが確認された。また, 救命可能性についても, Fig. 13の結果より, 各kp地点別, 流入ランプ別において, 大幅に向上していることが確認できる。特に, 6kp地点で事故が発生した場合は, 救命措置による死亡率が0%となっている。そのため, 事故発生から5分以内であれば, どの流入ランプから救急車両が流入した場合でも, 受傷者に救命の可能性を与えられる確率が高いことが分かる。

以上の結果より, 生存確率の高い救命活動を行うために, 高速道路管理者は, 事故発生後の素早い事故現場の

(a) Each kp point

(b) Each enter ramp

Fig. 12 Mean value and standard deviation of T_E after executing improvement measure.

(a) Each kp point

(b) Each enter ramp

Fig. 13 Expected lifesaving effect after executing improvement measure.

特定、消防機関への迅速な情報連絡、救急緊急車両用の道路の確保が重要である。そのためには、道路監視カメラの増設、ドライバー等への位置情報の提供、非常電話機の増設等の改善を実施する事が迅速な救命活動を行う上で重要であると考えられる。

5 結 言

本研究では、膨大な交通量を誇る都市高速道路における迅速な救命活動を可能にするために、著者らが開発を進めている交通シミュレーションシステムを用いて、実際の阪神高速道路における救命活動の有効性と問題点について検討した。具体的には、事故発生時の状況と消防機関による救命活動をシミュレーションシステムで再現し、救命措置開始時間を計測することにより、救急措置の開始を遅らせる要因と、普通・大型車両による救急車両の走行支援の重要性を明確化した。また、カーラーの救命曲線を用いて、シミュレーションで実施した救命活動により、出血多量の受傷者に対する救命可能性がどの程度存在するのかについて検討した。さらに、救命活動の改善策として、高速道路への流入時間を短縮化した場合の救命活動実施状況を再現し、事故発生後の消防機関への情報連絡が速い程、救命可能性が向上することを証明した。

しかしながら、本論文で検討した救命活動では、救命措置実施後の病院への搬送が考慮されていない。受傷者を救うためには、病院での本格的な治療が最も重要であると考えられるので、救急車両が事故現場到着後に高速道路と一般道路を走行し、救急病院への搬送が完了するまでの時間について考慮する必要がある。また、本論文で用いたカーラーの救命曲線は、救命可能性を検討する上での一つの目安であり、具体的な症例を通じた医学的検討も行うことで、より詳細な救命活動の安全性について今後検討したいと考えている。

最後に、本研究を実施するに当たり、阪神高速道路(株)様から貴重な資料の提供を頂くとともに、有益な助言を賜った。関係各位に御礼申し上げる。また、本研究は、平成 22 年度文部科学省科学研究費・基盤研究 (C) の助成を受けて実施したものである。関係各位に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) S. Saito, N. Koike, Y. Inoue and H. Noguchi, "Effect of emergency service with medical helicopters in a highway accident", *Journal of Safety Problem*, Vol.3, pp.125-130 (2008).
- 2) T. Futagami, M. Kashiwadani and M. Watanabe, "The current state and the subject of traffic accidents cognition and ambulance dispatches on a highway", *Journal of Safety Problem*, Vol.5, pp.131-136 (2008).
- 3) K. Akieda, Y. Nakagawa, K. Umezawa, M. Motojuku, I. Yamamoto, S. Ino and S. Inokuchi, "Necessity of doctor helicopter mobilization to sick person on expressway", *Journal of Japanese Society for Aeromedical Services*, Vol.6, No.9, pp.39-43 (2005).
- 4) R. Horiguthi, M. Kuwabara and M. Katakura, "Improvement in traffic flow calculation technique with the traffic simulation system AVENUE", *Annual Meeting of JSCE Infrastructure Planning*, Vol.4, pp.452-453 (1996).
- 5) Y. Iida, S. Fujii and T. Uchida, "A dynamic traffic simulation model considering a route choice behavior on road network", *Proceedings of JSCE*, Vol.536, pp.37-47 (1996).
- 6) M. Okushima, T. Ookubo and T. Daito, "Development of traffic simulation for evaluation of traffic control measure on urban expressway", *Proceedings of Infrastructure Planning*, Vol.20, pp.531-538 (2003).
- 7) M. Yamawaki, W. Shiraki, H. Inomo and K. Yasuda, "Development of traffic simulation for urban expressways and its application to business continuity plan", *Journal of Safety Problem*, Vol.5, pp.55-60 (2010).
- 8) M. Yamawaki, W. Shiraki, H. Inomo and K. Yasuda, "Development of traffic simulation system for construction support of BCP in urban expressways", *Natural disaster forum at shikoku branch of Japan Society of Civil Engineers*, Vol.23, pp.87-94 (2011).
- 9) H. Oouchi, M. Yamamoto and H. Kawamura, "Basis and application of multi-agent system -computing paradigm of complex systems engineering-", pp.1-15 (2002) Corona Publisher.
- 10) Hanshin Expressway Company Limited, "New action program for traffic congestion control", pp.4-7 (2006).