

## 地震被災時の救急駆けつけ搬送の時間信頼性に基づくリスク分析 \*

柳沢吉保\*<sup>1</sup>・轟 直希\*<sup>2</sup>・古本吉倫\*<sup>3</sup>・和久井 瞳\*<sup>4</sup>・高山純一\*<sup>5</sup>Risk Analysis of Travel Time Reliability of Emergency Car  
with a Limit Time to Life-SavingYANAGISAWA Yoshiyasu, TODOROKI Naoki, FURUMOTO Yoshinori,  
WAKUI Hitomi and TAKAYAMA Jun-ichi

This paper discusses transportation network reliability in time of disaster and the evaluation of emergency conveyance service framework. Analyzing the present condition of an emergency business, in this study we examine the optimal location of fire stations and first-aid station. We propose an accessibility indicator of the travel time reliability to the urgent medical institution of an ambulance. In this paper, the above method is applied to Nagano urban area. In the experimental study, we verified location of fire stations and first-aid station affects a limit time to life-saving. We confirmed accessibility indicator practicality.

キーワード：地震被災，救急駆けつけ搬送，時間信頼性，リスク分析

## 1. まえがき

## 1-1 本研究の背景と目的

我が国で発生が懸念されている東海地震や東南海地震などのプレート境界型地震，内陸部に多く存在する活断層を原因とする地震に対して被害想定が積極的に行われ，その対策について検討されている。長野県にも活断層が多く分布しているが，特に糸魚川-静岡構造線，信濃川断層帯，伊那谷断層帯，阿寺断層帯は長野県に甚大な被害をもたらす可能性が高く，地震発生時の対応策を至急検討しなければならない。

大規模地震による被害事例として，阪神淡路大震災が挙げられる。被災当時の救急活動は，交通渋滞により大きな影響を被った。特に，被災地外からの応援(消防，警察，自衛隊)が道路渋滞に巻き込ま

れ到着に時間がかかったことは，救助活動が大幅に遅れる一因となった。道路渋滞の最大の原因は，落橋などによる幹線道路の寸断であったが，安否確認や見舞などといった救助以外の自動車の殺到や交通規制の難しさも渋滞に拍車をかけた。これらの問題を踏まえ，救助部隊を円滑に被災現場に到着させる交通規制や，救助部隊を現場や搬送先まで交通渋滞を回避しながら円滑に誘導するための救急拠点(消防署・分署)や搬送拠点(後方病院)の配置が重要な課題となっている。

長野市では地震発生時の救急体制として，市内に消防署・分署を 15 箇所，後方病院を 8 箇所配置している。しかしながら，長野市の救急駆けつけ搬送拠点が，必ずしも地震による被災位置や重傷者数を考慮して配置されているわけではない。そこで，重傷者数や被災位置を考慮した消防署・分署，後方病院の最適配置について検討することが必要である。

また地震被害は広い範囲でほぼ同時刻に発生する。その場合重傷者はわずかな時間で急激に増加し，一度に救急要請が集中してしまうことから，地震被災の対策をおこなう上で被害の同時多発性は考慮に入れるべき事項である。そこで信濃川断層による地震で道路および重傷者が同時被災した場合，救命率などの被害の大きさを評価するためのリスク分析を行

\* 2018 年 10 月 27 日長野市未来トークにて発表

\*1 環境都市工学科教授

\*2 環境都市工学科准教授

\*3 環境都市工学科教授

\*4 通信土木コンサルタント株式会社  
(平成 30 年度 環境都市工学科卒業)

\*5 金沢大学教授

原稿受付 2019 年 5 月 20 日



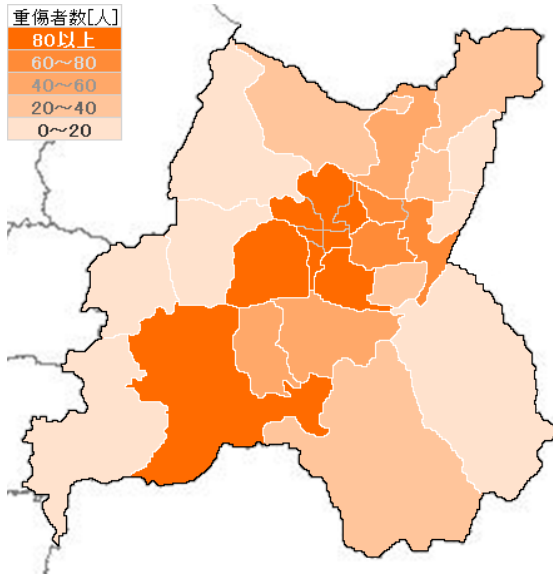


図3 長野市内各地区の重傷者数分布

表2 信濃川断層帯による地震発生時の被害生起数

	盛土	切土	橋梁
災害の対象となるリンク	7	248	88
通行不可となる箇所	3	39	5

は重傷者数が多いことがわかる。

### 2-3 被災により通行不可となる道路区間

本研究では平成14年度長野県地震対策基礎調査報告書<sup>9)</sup>において、震度階別被害生起確率を考慮して作成された長野都市圏交通ネットワークの被害生起箇所を元に道路を「通行可」、「通行不可」の二つのパターンに分けて解析を行う。表2に被災時に通行不可となる道路および橋梁の数を示す。

## 3. 長野市交通ネットワークの時間信頼性評価システムの構築

### 3-1 救命制約時間信頼性の概念<sup>3)</sup>

時間信頼性評価は、被災による重傷患者の程度により駆けつけ搬送先病院までの救命制約時間を  $t_d$  とし、経路  $r$  の実所要時間分布は平均所要時間  $E(t_r)$  および分散  $V(t_r)$  により与えられる。経路  $r$  において救命制約時間  $t_d$  までに駆けつけ搬送行動が完了する確率  $R$  を時間信頼性指標とする。概念を図-3に示す。

$$R_r^+ = \int_0^{t_d} p\{E(t_r), V(t_r)\} dt_r \quad (1)$$

指標の概念を図4に示す。

なお、所要時間の変動は正規分布に従うと仮定する。

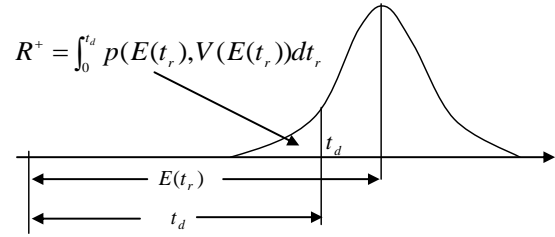


図4 救命制約時間  $t_d$  の時間信頼性

### 3-2 経路配分と所要時間分布<sup>3)</sup>

本研究では各OD間の経路配分を行う際に、所要時間を確率変数として与える。被災時の交通量  $x_l$  が大きく変動することを考慮し、 $x_l$  は確率変数として扱った。リンク所要時間の算出には、式(2)のBPR関数を用いて所要時間を算出する。

$$t_l = t_{l0} \times \{1.0 + \kappa \times \eta \times (x_l / C_l)^v\} \quad (2)$$

ここで、 $l$ : リンク  $l$ ,  $t_l$ : 所要時間,  $t_{l0}$ : 自由走行時間,  $x_l$ : 交通量,  $C_l$ : 交通容量, BPR関数パラメータとして、米国道路局の  $\kappa=0.15$ ,  $v=4$  を用いた。また、救急車両と一般車両を区別するため交通量軽減係数  $\eta$  を乗じた。交通量軽減係数  $\eta$  は一般車両では1.0である。既往研究<sup>2),3)</sup>により、救急車両で現場まで駆けつける場合、前方の車両の影響が少なく信号を無視できるため、一般車両より速く到達できることを考慮して0.35と設定した。一方、後方病院までの搬送は、重傷者を乗せているので、安全を考慮し0.70と設定した。本研究では日常的に交通量が大きく変動することを考慮し、交通量  $x_l$  は確率変数として扱い、積率母関数の性質を用いることで所要時間の変動を与えた<sup>3)</sup>。

### 3-3 救命制約アクセシビリティの算定方法

被災時において同時多発的に発生する被災者の救命率を上げるためには、駆けつけ搬送時間だけでなく、被災地で発生する重傷者数と重傷者の搬送に対応できる救急車両数も考慮する必要がある<sup>3)</sup>。本研究で用いる時間信頼性を考慮した駆けつけ搬送の評価指標として救命制約アクセシビリティを用いる(以下、救命ACと呼ぶ)。救命ACは、各地区で発生が予想される重傷者数、各消防署・分署に配備されている救急車両台数を考慮し、以下のように構築する。

①消防署・分署  $i$  の救急車両が救命制約時間  $t_d$  内に要請のあった被災地区  $j$  に駆付け、後方病院  $k$  に搬送できる確率を  $p_{ijk}$  とし、消防署・分署  $i$  の救急車両数を  $E_i$  とすると、消防署・分署  $i$  の救急車両が救命制約時間内に重傷者の救命に対応できる可能性は、

$$E_i \times p_{ijk} (t \leq t_d) \quad (3)$$

である。  $p_{ijk}(t \leq t_d)$  の算定には、救急駆けつけ搬送所要時間関数式(2)を用いる。

②被災地区  $j$  で発生した重傷者数を  $P_j$  とすると、被災者一人当たり、消防署・分署  $i$  から駆けつけた急車両を割り当てられる可能性、すなわち消防署・分署  $i$  から出発した救急車両が、被災地  $j$  に駆けつけ、後方病院  $k$  に搬送する場合の救命 AC は、式(4)で表わす。

$$C_{ji,k} = E_i \left\{ \frac{p_{ijk}(t \leq t_d)}{P_j} \right\} \quad (4)$$

そこで被災地  $j$  の重傷者が救命制約時間内に後方病院へ搬送される可能性を表す総救命 AC は、以下の指標  $C_j$  で表すこととする。

$$C_j = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K E_i \left\{ \frac{p_{ijk}(t \leq t_d)}{P_j} \right\} \quad (5)$$

ここで

$C_j$ : 都市圏内の消防署・分署から出動した救急車両が被災地区  $j$  の重傷者を救命制約時間内に都市圏内後方病院搬送できる可能性を示す総救命 AC.  $E_i$ : 消防署・分署  $i$  が所有する救急車両台数.  $p_{ijk}(t \leq t_d)$ : 消防署・分署  $i$  から出動した救急車両が被災地区  $j$  の重傷者を救命制約時間  $t_d$  内に後方病院  $k$  に搬送できる時間信頼度.  $P_j$ : 地区  $j$  内で発生した重傷者数.

式(4)は救命制約時間信頼度が最も高くなる消防署・分署および後方病院の組み合わせを明らかにする、効果的な救急車両の出動要請を行う、消防署・分署および後方病院の被災地への適切な救急駆けつけ搬送サービス圏域を検討することができる指標と考える。一方、式(5)は、被災地ごとに救命制約時間信頼度が高い駆けつけ搬送サービスを受用できる近接している消防署・分署および後方病院がどれだけあるかを判断するための指標であり、消防署・分署および後方病院の配置および指定数を検討できる指標と考えられる。なお、配置問題は別途検討するため、以下では、式(4)を用いた検討を行う。

## 4. 救命制約時間信頼性及び AC 評価シミュレーション

### 4-1 救命制約時間の設定

カーラーの救命曲線から、死亡率が 50%まで上がってしまう確率は重篤度ごとに、心臓停止後約 3 分、呼吸停止後約 10 分、多量出血後約 30 分であることが分かっている。本研究では先に述べたとおり、被災者は多量出血者として救命率 50% のケースを評価するとし、救命制約時間を 30 分と設定する。

### 4-2 救命制約時間信頼性及び AC 評価フロー

図 5 に救命制約時間信頼性及び AC 評価を行うまでのフローを示す。まず、地震が起きた際に長野市

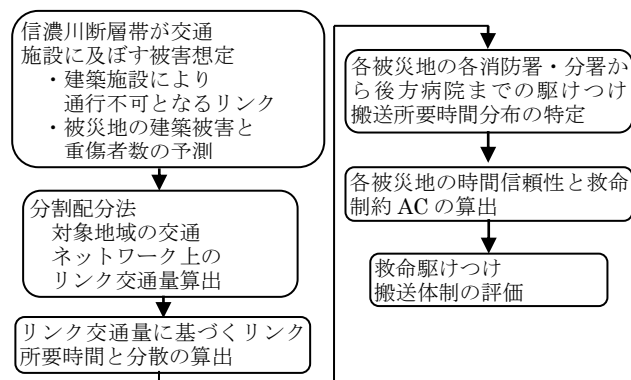


図 5 救命制約時間信頼性及び AC 評価フロー

に大きな影響を与えると予想される信濃川断層帯が及ぼす具体的な被害想定を行う。次に、分割配分法により、各リンク交通量、所要時間、分散を求める。

3-2 節で述べたリンク所要時間と分散が算出され、リンクの組み合わせからなる各 OD の利用可能な経路の時間信頼性及び救命 AC を求めることができる。

具体的な計算ステップは以下の取りである。

**STEP1**: 分割配分法のためのリンク自由走行時間、BPR 関数パラメータ、OD 交通量を入力する。地震後被災リンク本数を考慮した交通容量および、重傷者数を入力する。

**STEP2**: 分割配分法により分析対象ネットワークを構成する各リンク交通量を算出する。地震被災後のリンク交通量も算出する。

**STEP3**: BPR 関数に基づくリンク実所要時間と分散を式(2)を用いて算出する。

**STEP4**: ルートリンクマトリクスに基づき、リンク実所要時間と分散から、救急駆けつけ搬送までのルート実所要時間と分散を算出する<sup>3)</sup>。

**STEP5**: 選択可能な経路について時間信頼度を式(1)で、救急 AC 値は式(4)で算出する。

**STEP6**: 時間信頼度の大きさを考慮し、消防署・分署の駆けつけ搬送の勢力圏を決めるとともに、重傷者数および車両台数を考慮した AC 値を用い、同時多発的に被災者が発生した時の、各消防署・分署の勢力圏に対するリスク分析を行う。

## 5. 消防署・分署の駆けつけ搬送の勢力圏に対するリスク分析

### 5-1 分析内容の設定

シミュレーションは、地震被災前後の比較を行う。分析内容は以下のとおりである。

分析 1: 地震被災前後の各地区の救命時間信頼性を比較する。

地震被災時の救急駆けつけ搬送の時間信頼性に基づくリスク分析

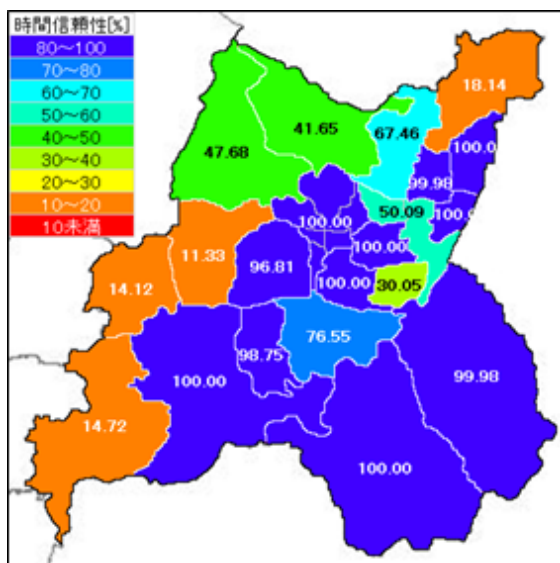


図6 地震被災前の時間信頼性分布図

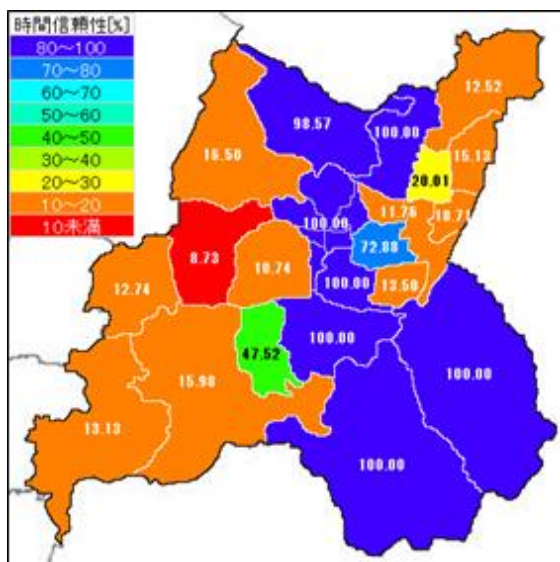


図7 地震被災後の時間信頼性図

分析2：地震被災後の各消防署・分署の勢力圏とAC値の変化を確認する。

以上を分析することにより、同時多発的に地震被災が生起したときの重傷者も含めた現在の消防署・分署の配置に対するリスクについて検討・考察する。

5-2 地震被災前後の救命時間信頼性

地震被災前後の各地区の救命制約時間信頼性を図6, 7に示す。

図6より、被災リンクが発生していない状態でも、市内21支所のうち7支所で時間信頼性が50%を下回る結果となった。また、中山間地域の七二会地区や小田切地区における時間信頼性は10%代の結果となった。一方、三輪地区、安茂里地区、芹田地区と

表3 地震被災後の三輪地区時間信頼性順位

順位	駆けつけ元	搬送先	時間信頼性 [%]	渋滞割合 [%]	
				駆けつけ	搬送
1	若槻分署	朝日ながの病院	100.00	23447	-
1	中央消防署	朝日ながの病院	100.00	743	-
3	中央消防署	朝日ながの病院	9330	988	-

表4 地震被災後の長沼地区時間信頼性順位

順位	駆けつけ元	搬送先	時間信頼性 [%]	渋滞割合 [%]	
				駆けつけ	搬送
1	若槻分署	リハビリテーション	1513	7398	-
2	柳原分署	リハビリテーション	1089	4703	-
3	中央消防署	リハビリテーション	888	2280	-

いった長野市中心市街地周辺に位置する地区では、時間信頼性が非常に高い。これは、駆けつけ先である支所の付近に消防署や後方病院が集中しているためと考えられる。篠ノ井地区や松代地区においても同様の理由から高い時間信頼性が得られた。

図7の被災後では、市内21支所のうち13支所で時間信頼性が50%を下回る結果となった。小田切地区の時間信頼性が10%を下回る結果となった。20%未満の地区は11地区にのぼった。

被災前と比較し、安茂里地区、川中島地区、篠ノ井地区、長沼地区、古里地区、柳原地区において救命信頼度の大幅な減少が見られた。低下率は長沼地区が最も大きく、低下率は約85%であった。以上から、被災後は、長野市内の救急駆けつけ搬送体制に与える影響は非常に大きいことがわかる。

ここで、地震被災後も時間信頼性の高い三輪地区と低下率の高い低い長沼地区の時間信頼度および駆けつけ消防署・分署を表3, 4に示す。それぞれ時間信頼性の高い順に消防署・分署と後方病院の組み合わせおよび利用ルートでの自由走行時に対する被災後の所要時間の増加率を渋滞割合として3つ記載した。

三輪地区は駆けつけ元は若槻分署か中央消防署、搬送先は朝日ながの病院で消防署分署および後方病院ともに時間信頼性に大きな変化がないことから地震被災時のリンク通行不可の影響がない地区であることがわかる。若槻分署から三輪地区までは渋滞は見受けられるものの、所要時間は短いことからしんらいどの低下は見られなかった。

長沼地区は搬送先に変化はないものの、駆けつけ元の消防署分署に大きな変化が見られる。各消防署分署から長沼地区までの搬送ルートに地震被災によるリンク通行不可の影響が大きく出ていることがわ

表5 消防署・分署の救命勢力圏

地区 (救急車台数)	消防署・分署	後方病院	時間信頼性 [%]	重複 支所数	救命AC [%]	勢力圏指標 [%]
若槻分署(1)				2		
浅川	若槻分署	東長野病院	41.65		3.79	1.89
若槻	若槻分署	東長野病院	67.46		3.21	1.61
穂原分署(1)				3		
長沼	穂原分署	リハビリテーションセンター	100.00		33.33	11.11
長野	穂原分署	東長野病院	18.14		2.27	0.76
穂原	穂原分署	リハビリテーションセンター	100.00		14.29	4.76
安茂里分署(1)				3		
安茂里	安茂里分署	長野赤十字病院	96.81		2.20	0.73
七二会	安茂里分署	篠ノ井総合病院	14.12		2.82	0.94
芹田	安茂里分署	長野赤十字病院	100.00		1.96	0.65
中央消防署(2)				5		
朝陽	中央消防署	長野中央病院	50.09		3.13	0.63
古里	中央消防署	長野市民病院	99.98		13.33	2.67
芋井	中央消防署	長野中央病院	47.68		19.07	3.81
古牧	中央消防署	朝日ながの病院	100.00		7.41	1.48
三輪	中央消防署	朝日ながの病院	100.00		1.42	0.28
小田切	中央消防署	朝日ながの病院	11.83		11.33	2.27
若槻分署(1)				2		
大島島	若槻分署	長野赤十字病院	30.05		3.00	1.50
若槻	若槻分署	篠ノ井総合病院	99.98		14.28	7.14
篠ノ井消防署(2)				5		
川中島	篠ノ井消防署	篠ノ井総合病院	98.75		8.98	1.80
東北	篠ノ井消防署	篠ノ井総合病院	76.55		9.01	1.80
松代	篠ノ井消防署	松代総合病院	100.00		22.22	4.44
信更	篠ノ井消防署	篠ノ井総合病院	14.72		7.36	1.47
篠ノ井	篠ノ井消防署	篠ノ井総合病院	100.00		4.44	0.89
松代分署(2)						

かる。しかし、いずれも搬送先の後方病院までのルートでは渋滞が発生していないことがわかる。消防署分署の配置が課題であると言える。

### 5-3 地震被災後の消防署・分署勢力圏とAC値に基づくリスク分析

前節で得られた被災後の時間信頼度と式(4)で示した重傷者数と救急車両の台数を考慮した救命制約AC指標を用い、駆けつけ搬送の重複度を考慮した消防署・分署の勢力圏の設定を行う。勢力圏指標とは各地区で最も高い信頼度の消防署・分署および後方病院の組み合わせを、地区ごとにまとめた指標であり、重傷者数と消防分署の重複度合を示した信頼度の指標である。具体的には救命ACを重複数で除した値である。勢力圏では地震災害により重症者が同時に発生した際に、どの消防署・分署に駆けつけ要請が集中しやすいのか確認することで、同時多発被災のリスクを考察できる。

救命の時間信頼性の高さから、中央消防署および篠ノ井消防署への駆けつけ搬送要請が高まることから、予想される。同時多発的に被災者が発生した場合に、これらの消防署分署に要請する地区の勢力圏指標を見ると、救命制約信頼度が5%未満で、救命率がかなり低下していることがわかる。

## 6. おわりに

本研究では、信濃川断層による地震で道路が通行止めになった場合の重傷者の救命制約時間を30分としたときの救命時間信頼度を被災前後で比較した。被災後のシミュレーションは、道路復旧までのある程度時間が経過した場合を想定した結果を示している。被災前後と比較すると多くの地区で、救命時間信頼度が大きく低下している結果となった。被災直後であれば被災状況の不明さから、大きな渋滞が生

起し、さらに救命信頼度低下が予想される。本研究では、重傷者が同時多発被災した場合、救命率にどのような影響が及ぶか、また救命時間信頼度の高い消防署分署への同時要請による影響を、救命勢力圏を用いて明らかにし、時間信頼性だけではない救命のリスク分析もおこなった。以下、本研究で得られた知見を示す。

(1) 三輪地区や七二会地区、小田切地区における住宅の耐震化率が低いことから、住宅被害率が高くなった。また、三輪地区においては倒壊による建物被害だけでなく、焼失棟数も他の地区に比べて多い。

(2) 重傷者数は、世帯数の多い三輪地区、芹田地区、安茂里地区、篠ノ井地区で多いことが分かった。一方、住宅被害率の高かった七二会地区や小田切地区では、世帯数が少ないことが理由で、重傷者数は少なくなることも明らかとなった。

(3) 被災前でも、市内21支所のうち7支所で時間信頼性が50%を下回る結果となった。また、中山間地域の七二会地区や小田切地区における時間信頼性は10%代の結果となり非常に低い水準であることが分かった。

(4) 駆けつけ先である支所の付近に消防署や後方病院が集中している三輪地区、安茂里地区、芹田地区といった長野市中心市街地周辺に位置する地区では、時間信頼性が高い。

(5) 被災後では、市内21支所のうち13支所で時間信頼性が50%を下回る結果となった。小田切地区の時間信頼性が10%を下回る結果となった。20%未満の地区は11地区に上った。被災前と比較し、安茂里地区、川中島地区、篠ノ井地区、長沼地区、古里地区、柳原地区において大幅な減少が見られた。低下率は長沼地区が最も高く、低下率は約85%であった。

(6) 地区によって、地震被災前後ともに高い時間信頼性を示す搬送経路が複数存在する。また時間信頼性の観点から駆けつけ搬送の際に1つの消防署または後方病院に駆けつけ元・搬送先を依存している地区も存在することが判明した。

(7) 被災前後とも駆けつけ時に大きな渋滞が生起していることがわかった。現在の消防署・分署の配置に課題があるといえる。

(8) 消防署・分署の時間信頼度に基づく重複度から、地震被災後は若槻分署、中央消防署、若穂分署に救急要請が集中し、配置後には若槻分署に集中する可能性がある。

(9) 長野市内に存在するリンク806本のうち、救命率を低下させていると考えられるリンクは74本

となった。そのうち、きわめて渋滞が大きくなるリンクは 26 本存在し、救命率の低下に大きく影響していると考えられる。これらの道路の整備が必要になる。

### 参 考 文 献

- 1) 尾曾真理恵, 柳沢吉保, 高山純一他: 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評価について. 平成 20 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集(2009.3.3)pp.403-404
- 2) 尾曾真理恵, 柳沢吉保, 古本吉倫, 高山純一, 和泉佑紀: 救命制約時間を考慮した救急車両の地震被災地への未到達危険度評価. 土木計画学研究・講演集 No.42 (講演番号 117), 2010.11
- 3) 柳沢吉保, 古本吉倫, 高山純一, 南澤智美, 尾曾真理恵: 震災時における救急車の駆けつけ搬送圏域の救命制約時間信頼性評価.土木学会論文集 F6(安全問題),Vol68.No.2, pp.30-37, 2012.
- 4) 羽田 裕貴, 柳沢 吉保, 古本 吉倫, 轟 直希, 和田 彩花, 高山 純一: 救命制約時間を考慮した地震被災時の救急駆けつけ搬送体制. 平成 27 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 20616.3
- 5) 戸澤 謙弥, 柳沢吉保, 古本吉倫, 轟 直希, 和田彩花, 高山純一: 地震被災時の救急駆けつけ搬送救命制約時間信頼性を考慮した交通ネットワーク評価システムの構築. 平成 29 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 2018.3
- 6) 平成 14 年度長野県地震対策基礎調査報告書