

長野都市圏交通ネットワークにおける地震被災時の 救命制約時間未到達危険度の算定

柳澤吉保^{*1}・古本吉倫^{*2}・尾曾真理恵^{*3}・高山純一^{*4}

Travel Time Reliability of Emergency Car to Earthquake-affected Area with a Limit Time to Life-Saving

YANAGISAWA Yoshiyasu, FUROMOTO Yoshinori
,OSO Marie and TAKAYAMA Jun-ichi

This paper discusses transportation network reliability in time of disaster and the evaluation of emergency care 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 a calculation method 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 current experimental study, we verified location of first-aid station affects a limit time to life-saving.

キーワード：救急駆けつけ搬送，時間信頼性，信濃川断層

1. はじめに

長野市では第4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。とくに地震発生による被災時への対応として消防・救急・救助体制の充実が求められている。現在長野市では、地震発生時の救急体制として、市内に消防署・分署 14 箇所、駆けつけ先救護所として市内中学校 13 箇所、搬送先である後方病院 8 箇所を配置している。一方、平成 14 年度長野県地震基礎調査

報告によると、長野市における被災対象となる橋梁は 88 箇所、盛り土は 7 箇所、斜面 248 箇所である。うち、信濃川断層帯により不通となる深刻な被害は、橋梁 5 箇所、盛り土 3 箇所、斜面 57 箇所とされるが、長野市の救急車両の救護所への駆けつけや後方病院などの搬送拠点が必ずしも、被災地点を考慮して配置されているわけではない。被災地点に対応した救急拠点、救護所、搬送先後方病院の組み合わせを考慮する必要がある。

地震被災時の救急拠点配置に関する既往研究として、高山ら¹⁾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²⁾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。一方、陶山らも指摘しているように被災時などの緊急時には日常的な交通状態から大きく変化すること、救急搬送には、

*1 環境都市工学科教授

*2 環境都市工学科准教授

*3 飯田市役所

*4 金沢大学大学院自然科学科教授

原稿受付 2011年5月20日

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。以上を考慮した被災時における駆けつけ搬送経路の評価に関する既往研究として尾曾ら³⁾は、マルチエージェントシミュレーションによる時間信頼性評価によって、最適経路の探索を検討している。ただし、陶山や尾曾らはシミュレーションによる分析であり、実際のエリアを対象に生起する地震の規模および交通ネットワークエリアの被災状況を対象に検討した知見は得られていない。

以上を考慮し本研究では、長野県北部に大きな被害を及ぼすとされる信濃川活断層が、長野都市圏交通ネットワークと長野市の被災時救急駆けつけ搬送行動に与える影響を検討する。具体的には、(1)信濃川活断層による地震発生が長野都市圏交通施設に与える影響およびその生起確率を整理する、(2)長野市の地震被災時の救急体制を整理する、(3)OD間経路選択モデルを用いたリンク交通量の算出と交通量の変動を考慮した長野都市圏交通ネットワーク時間信頼性評価システムを構築する、(4)長野市交通ネットワークをケーススタディとした被災時救急サービス駆けつけ時間信頼性を検討する、(5)被災後の道路寸断状況の認知度を考慮した経路選択行動の変更と時間信頼性の変化を検討する。

2. 信濃川断層による長野市道路の被害予測

長野県に影響を及ぼす主な地震は、糸魚川-静岡構造線、信濃川断層帯、伊那谷断層帯、阿寺断層系による地震、および東海地震である。このうち、おもに長野県北部に大きな影響を与える信濃川断層帯による地震の影響を分析する。長野県周辺の活断層については図1に示す。長野県地震対策基礎調査⁴⁾によると断層の長さは43km、断層の幅は21kmと大きく、断層の範囲は飯山市から長野市へとつながっている。地震動が最大となる断層上端深さは3km、最大想定地震規模はM7.5で、計測震度は平均値5.9、最大値は6.2にも達すると予測されている。本断層による地震被害は建築物の倒壊による人的被害のほかにも、交通施設およびライフラインにも甚大な被害を与えると予測されている。とくに地形的および地質的な要因により、長野市周辺では液状化や地滑りが起こりやすい場所が多くあり、土砂災害が被害を大きくする可能性がある。平成14年長野県地震対策基礎調査では、被災道路には通行不可となる事象が生起する確率が与えられている。そこで調査結果に記載されている被害予測データに基づき、通行不可となる状態を表1に示すとおり5つに設定した。



図1 長野県周辺の活断層⁴⁾

表1 長野都市圏内リンクにおける通行不可生起確率

通行不可状態 X	1	2	3	4	5
生起確率%	2	6	9	28	55
被災リンク数	47	26	20	6	0

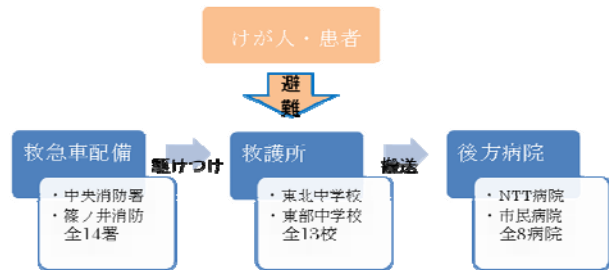


図2 長野市救急体制

3. 長野市救急駆けつけ搬送体制

3-1 長野市救急駆けつけ搬送体制

長野市の被災時救急体制は図2に示すとおりである。消防署・分署が市内全14箇所、救護所が市内中学校13箇所に配置されている。搬送先である後方病院は市内8箇所が指定されている。被災時には、救急車が各消防署・分署から出動し救護所に駆けつける。重傷者は後方病院に搬送されることになる。

救急車到着までに救命のための応急手当がとられることが重要とされている。生存率を上げるためには救急車ができるだけ現場に早く到着し、救命救急士などの救命医療専門家による救命処置が施される必要がある。そこで、本研究では駆けつけの時間信頼性に絞り分析を行った。

3-2 信濃川断層被災時の重傷者数

表2 各救護所に運ばれる重傷者数

*平成22年3月の世帯数を用いた。

救護所	周辺地区	世帯数	H _j (%)	R _j (%)	重傷者数
東部	三輪, 吉田	14613	6.1	0.6	86
西部	鬼無里, 戸隠他	18657	4.3	0.5	87
三陽	古牧	10293	25.1	1.5	158
東北	柳原, 古里他	8873	30.8	1.8	156
北部	浅川, 若槻, 豊野	10597	29.1	1.7	179
裾花	安茂里, 中条他	10421	15.2	1.1	114
犀稜	芹田, 大豆島他	21890	24.2	1.5	327
篠ノ井	篠ノ井, 信更他	16758	20.0	1.3	220
松代	松代	6885	19.4	1.3	89
若穂中	若穂	4293	12.7	1.0	42
川中島	川中島	9633	12.2	0.9	91
更北	更北の一部	2787	4.4	0.5	13
広徳	更北	8949	31.3	1.8	159

信濃川断層によって地震が発生した場合、長野都市圏で引き起こされる震度階は6前後であることを考慮し、病院駆けつけ搬送が必要な重傷被災者数を算出する。平成14年長野県地震対策基礎調査報告書に基づき被災者数を以下のように算出する。

$$\log R_j = 0.676 \cdot \log H_j - 1.409 \quad (1)$$

ここに、R_j: 救護所/周辺地区での重傷者発生率(%)、

H_j: 救護所/周辺地区での住家被害率(%)

住家被害率は、(全壊・大破棟数+1/2半壊・中破棟数+焼失棟数)/全建物数で定義される。建物の被災状況データおよび震度階等のデータが、500m×500mメッシュで与えられていることを考慮し、被災棟ごとのメッシュを数え、救護所の周辺地域すべての住宅被害率H_jを用いて、救護所jに運ばれてくる重傷者数を以下の手順で算出し、その結果を表2に示す。

本推計方法では、重傷者をさらに重傷度(心臓停止・呼吸停止・大量出血)別に推計することはできない。そこで本手法で推計された重傷者は地震による被災を考慮し、大量出血者とした。

4. 長野市交通ネットワークの時間信頼性評価

4-1 救急車両の救命制約時間信頼性評価フロー

①交通ネットワークの初期状態作成: H13年度長野都市圏PT調査データを用いる。分割配分法による配分交通量結果より得られた各経路をドライバーが選択可能な経路とする。さらに配分された交通量に基づき、リンク平均所要時間と分散を初期状態として算出する。

②ドライバーの予測所要時間分布の更新: ドライバーは経験した利用経路の実平均所要時間E(t_{r,n})および分散V(t_{r,n})を考慮し、予測平均所要時間E(t̃_{r,n})および分散V(t̃_{r,n})からなる予測所要時間分布を更新する。予測値と実測値との差を考慮し、次式により更新するも

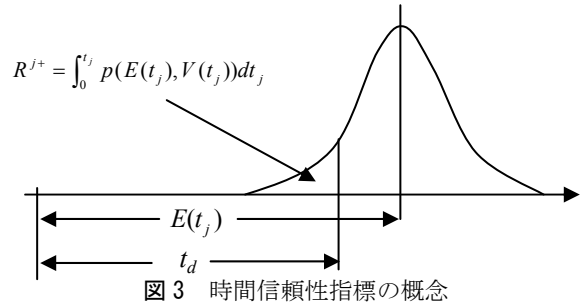


図3 時間信頼性指標の概念

のとする。ωは実所要時間に対する重みとする。

$$E(\tilde{t}_{r,n}) = E(\tilde{t}_{r,n-1}) + \omega \times \{E(t_{r,n-1}) - E(\tilde{t}_{r,n-1})\} \quad (2)$$

$$V(\tilde{t}_{r,n}) = V(\tilde{t}_{r,n-1}) + \omega \times \{V(t_{r,n-1}) - V(\tilde{t}_{r,n-1})\} \quad (3)$$

③ドライバーの経路選択行動: ドライバーは予測した所要時間分布に基づき、当該経路での実現が期待される予測平均所要時間より多めに見積もった所要時間t̂_{r,n}と、その所要時間を超過しまう見積所要時間超過確率F(t̂_{r,n})を考慮した以下の経路選択効用を知覚する⁵⁾。

$$V_{r,n} = \beta \times \hat{t}_{r,n} + \gamma \times F(\hat{t}_{r,n}) \quad (4)$$

したがって、ドライバーは式(4)で表される経路選択効用が最小になる見積所要時間t̂_{r,n}を知覚し、複数の選択可能経路のなかから、見積所要時間に基づく経路選択効用が最小になる経路を選択することになる。ここで既往研究⁶⁾により、効用関数パラメータβは-0.054、γは-2.825とする。経路選択行動は、式(4)に基づくロジットモデルを用いて、各経路の選択確率p_{r,n}を算出する。

$$p_{r,n} = \frac{\exp V_{r,n}}{\sum_{r'=1}^R \exp V_{r',n}} \quad (5)$$

得られた経路選択確率に基づいて各ODの経路およびリンク交通量を算出する。

④収束の確認: ②~④の過程を繰り返し当日の経路交通量と前日の経路交通量の差が許容範囲ε以内に入ったら収束状態とし、次の⑤で示す時間信頼性の計算に移行する。

⑤時間信頼性評価: 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とする。各経路の実所要時間分布は収束状態後に得られた、実平均所要時間E(t_{r,n})および分散V(t_{r,n})により与えられる。経路jにおいて救命制約による指定所要時間までに駆けつけ搬送行動が完了する確率R^{j+}を時間信頼性指標とする。指標の概念を図3に示す。

4-2 リンク所要時間およびその平均と分散の算出方法

前節(1)におけるリンク所要時間は、経路選択行動により生じたリンク交通量x_lにより、式(6)、(7)で示すBPR関数を用いて算出することになる。BPR関数パラメータとして、κ=0.15、ν=4を用いた。また、

救急車両と一般車両を区別するため、救急車両の式(7)では交通量軽減係数 η を乗じた。既往研究¹⁾により、交通量軽減係数 η は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 $\eta=0.35$ と設定した。

・一般車両の場合

$$t_l = t_{l0} \times \left\{ 1.0 + \kappa \times \left(\frac{x_l}{C_l} \right)^\nu \right\} \quad (6)$$

・救急車両の場合

$$t_l = t_{l0} \times \left\{ 1.0 + \kappa \times \eta \times \left(\frac{x_l}{C_l} \right)^\nu \right\} \quad (7)$$

しかしながら、本研究では被災時の交通量が大きく変動することを考慮するため、式(6)、(7)の x_l は確率変数として扱う。そこで、積率母関数の性質を用い、実平均所要時間の期待値(平均値)は式(8)(9)で、分散は式(10)で示す。

・一般車両の期待値

$$E(t_l) = E\left[t_{l0} \left\{ 1.0 + \kappa \left(\frac{x_l}{C_l} \right)^\nu \right\} \right] = t_{l0} \left\{ 1.0 + 0.15 \cdot \frac{E(x_l^4)}{C_l^4} \right\} \quad (8)$$

・救急車両の期待値

$$E(t_l) = E\left[t_{l0} \left\{ 1.0 + \kappa \eta \left(\frac{x_l}{C_l} \right)^\nu \right\} \right] = t_{l0} \left\{ 1.0 + 0.15 \cdot \eta \cdot \frac{E(x_l^4)}{C_l^4} \right\} \quad (9)$$

・一般車両と救急車両の分散

$$V(t_l) = \int_{-\infty}^{\infty} (t_l - E[t_l])^2 p(t_l) dt_l = \int_{-\infty}^{\infty} t_l^2 p(t_l) dt_l - E[t_l]^2 \quad (10)$$

ただし、一般車両の分散の $E(t_l)$ は式(8)に従い、救急車両の分散の $E(t_l)$ は式(9)に従う。

4-3 駆けつけ制約時間未到達危険度

救命制約に関する指定時刻までに到着できる時間信頼性の計算を行う。ここでは、それぞれの道路被災状態 X における交通ネットワークでの経路選択行動を算出し、経路交通量が収束状態における時間信頼性の評価を行う。

図3の概念と同様に、救急拠点 i が救護所 j に駆けつけるために経路 r を利用した場合の、重篤度 si ごとの到着指定時刻 t_d^{si} までに到着できる時間信頼性を計算することになる。

到達しやすさを表すアクセシビリティ型の目的関数を設定することを考える。ポテンシャル項には被災者数、従来の移動距離抵抗項の代わりに救命制約時間未到達確率を用いる。被災者が多く、重傷者の救命制約時間内に到達できない確率(救命制約時間未到達確率)が高い救護所ほど、適正な配置を検討しなければならないと考えられる。したがってここでは式(11)に示

すとおり、信濃川活断層の地震発生により被災した場合、救急拠点 i から救護所 j への駆けつけ未到達危険度により時間信頼性を評価する。

$$\{F_j \times R_j\} \times \{1 - R_{r,si}^+(i)\} \quad (11)$$

$\{F_j \times R_j\}$ は救護所 j に運ばれてくる重傷者数である。長野県地震対策基礎調査報告書では被災により道路は「通行不可」「通行可」の2つの状態 X が生じるので、それらにともなって病院までの時間信頼性も変化する。地震発生にともなって生ずる状態 X の生起確率を $p(X)$ とすると、上記で示した救命制約時間未到達性の期待値は、

$$\sum_{X=1} \{ \{1 - R_{r,si}^+(i | X)\} \times p(X) \} \quad (12)$$

と表すことができる。したがって救急拠点 i から救護所 j への駆けつけ救命制約時間未到達危険度は、

$$\{P_j \times R_j\} \times \sum_X \{ \{1 - R_{r,si}^+(i | X)\} \times p(X) \} \quad (13)$$

と表すことができる。したがって、救護所 j の駆けつけ救命制約時間未到達危険度 A_j は、

$$\Lambda_j = [(P_j \times R_j) \times \sum_i \sum_X \{ \{1 - R_{r,si}^+(i | X)\} \times p(X) \}] \quad (14)$$

と表すことができる。救急搬送サービス提供圏域の最適化のための消防署・分署配置をおこなう場合、本期待救命制約時間未到達危険度を最小にする救急拠点 i 、救護所 j の組み合わせを考えることになる。

5. ケーススタディ

5-1 ケースの設定

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、①心臓停止($si=1$)後約3分、②呼吸停止($si=2$)後約10分、③多量出血($si=3$)後約30分であることがわかっている。救急車到着までに救命処置がとられることが重要とされているが、救急車ができるだけ現場に早く到着し、救急隊などの救命の専門家が対応することが重要であるとされる。以上を考慮し、本研究ではまず、消防署や分署から救護所への駆けつけ移動時間の信頼性に着目し、時間信頼性を最大にする消防署や分署の最適配置のための考察を行う。

5-2 結果と考察

式(14)を用いた各救護所の駆けつけ救命制約時間未到達危険度を図4に示す。長野市内を13箇所の救護所が設置されている地区を中心に、学区を考慮した13の大ゾーンに分割した。各地区は算出された救命制

長野都市圏交通ネットワークにおける地震被災時の救命制約時間未到達危険度の算定

約時間未到達危険度に基づいて6段階に色分けした。赤色は重傷被災者が多いにも関わらず消防署・分署から救護所まで救命制約時間内に到達しにくく、青色に近づくにしたがって時間内に到達する確率が大きい地区である。被災により不通となる可能性が高いリンクは赤色に色づけた。長野市の中心地である、長野駅南側の芹田・大豆島地区において未到達危険度が高いことがわかる。本地区は木造建築物が多く、被災時に倒壊などの事象が生起する可能性が高く、重傷者が多数発生する可能性も高い。拡大図を見ると本地区の近隣4箇所消防署・分署が配置されている。図4より、犀川にかかる落合橋が被災に不通になる可能性が高く、若槻分署からの駆けつけは困難な状況が想定される。一方、中央消防署および中氷飽分署と犀稜中を結ぶ道路はとくに被災による不通となる可能性は低いことが分かる。そこで、被災時に不通リンクが生じることによる交通渋滞状況もあわせて検討するため救命制約未到達危険度と交通渋滞との関係を図5に示す。

凡例では、黒は混雑を起こしていないが、黒以外は混雑が生じていることが生じていることを示している。図5みると、未到達危険度の高い芹田・大豆島地区内の幹線リンクの多くは、被災後比較的大きな渋滞が生じる可能性があることがわかる。中央消防署から犀稜中救護所を結ぶ最短経路で渋滞が生じているばかりでなく、その周辺の迂回経路も比較的大きな渋滞が生じている。長野都市圏の未到達危険度分布の特徴は、オレンジや黄色などの中程度の危険地区は少ないが、極端に危険な地区か、あるいはある程度安全が確保されている地区に分類されることがわかる。

以上から救護所に対する消防署・分署の配置には、最短経路に不通リンクが含まれていないか、また迂回経路が存在する。さらに迂回経路に渋滞が生じないかを検討する必要がある。

6. まとめ

以下、本研究で得られた知見を述べる。

(1) 平成14年長野県地震対策基礎調査報告書から、盛土や切土が存在する道路では多くの箇所被害を受ける可能性が高いことが予測されている。とくに切土などの斜面では高い確率で被害を受ける箇所が多い。また、橋梁も盛土と比べ通行制限を受ける箇所が多いこ

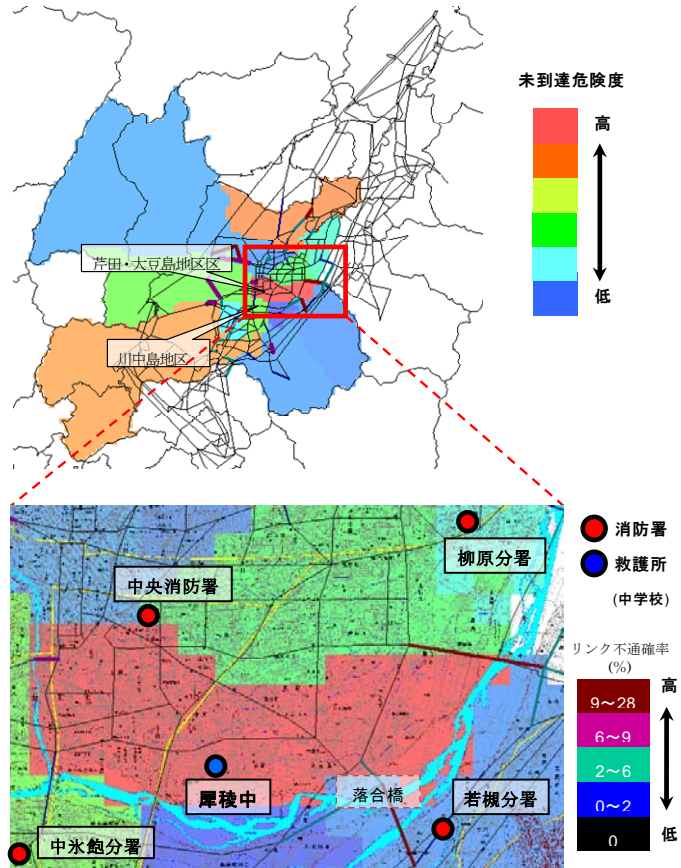


図4 救命制約時間未到達度と道路被害との関係

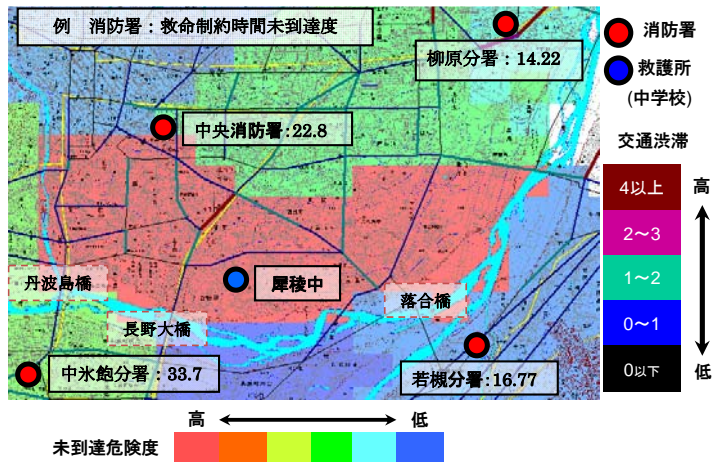


図5 救護所別制約時間未到達危険度と交通渋滞との関係

とが予想されている。山間地や河川に挟まれた地区では、交通制限を受ける確率が高く、河川に挟まれた川中島地区や、山間地域は、交通被害を受けやすい。(2) 同調査報告書から 橋梁は盛土と比べ通行制限を受ける箇所が多いことが予想されている。橋梁は交通ネットワークにおいてとくに交通量が集中しやすい重要な箇所となる場合が多く、橋梁が被災した場合、救急搬送に大きな影響を与えることが想定される。調査報告結果を長野都市圏地図と対応させると、河川に挟

まれた川中島地区や、その周辺地区では橋梁に車両が集中し、橋梁が被災することで、通行不可となったり、大きな渋滞が生じ、周囲の地域から隔離されてしまう危険性が高いことがわかる。

(3)地震発生時にリンクが不通にならなかった場合でも、犀陵中への駆けつけ経路では 30 分以内の到着可能性は 10~53%であった。現状であっても迅速に救命処置を行うことが難しい救護所がある。移動距離で消防署・分署の配置を決めるのではなく、交通量およびその変動を考慮した配置を考える必要がある。

(4)被災する可能性が高いリンクのすべてが不通になってしまう最も危険なケースでは、多くの救護所への移動で大幅な時間信頼性の低下がみられた。これは、最寄り消防署・分署から救護所までの最短経路が不通となり、大きな迂回を行わざるをえない結果である。

(5)救命制約時間未到達危険度の観点では、木造建築物が多く、被災時に多くの重傷者が発生する可能性が高い場合と、救護所に繋がる最短リンクが被災する可能性が高い場合、迂回経路を利用しなければならない地区が危険である。

(6) 救護所に対する消防署・分署の配置には、最短経路に不通リンクが含まれていないか、また迂回経路が存在するか、迂回経路に渋滞が生じないかを検討する必要がある。

(7) 重症者が多数発生することが予想される地区には、複数台の救急車が配車することも検討しなければならない。

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、日本都市計画学会学術論文集、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) 尾曾、柳沢、高山他：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概要集、pp. 403-404、2009. 3
- 4) 平成 14 年長野県地震対策基礎調査報告書
- 5) 内田 敬：情報提供を考慮した動的経路選択の交通行動分析に関する研究、pp. 113-136、1993. 12
- 6) 増井、尾曾、柳沢、古本他：信濃川断層を考慮した被災時救急搬送サービスの信頼性評価に関する研究、平成 21 年度土木学会中部支部研究発表会概要集、pp. 393-394、2010. 3