

63. 大規模地震による重傷者の搬送計画モデル

*東北大学東北アジア研究センター 正会員 奥村 誠
立命館大学理工学部 正会員 塚井 誠人
四国旅客鉄道株式会社 非会員 安村 勇亮

1. はじめに

島嶼部における架橋や高速道路の整備効果として、大規模地震時等の災害時における死亡リスクを小さくすることが期待されており、実際、高速道路の IC 近くに高次救急医療施設を移転させた国立病院岡山医療センターや、救急車専用の高速道路出口を整備した山形県立中央病院などの例がある。

大規模地震発生時には広域で同時多発的に発生する被災者をいかに早く病院へ搬送して治療を行うかが重要であるが、このとき医療機関の患者受け入れ体制が十分であっても、道路の渋滞や寸断によってスムーズな搬送ができなければ適切な治療を行うことは不可能となる。近年の自治体財政の緊迫化により公立病院の閉鎖や統合が検討されている中で、緊急医療の保持のために医療機関と道路の整備をどのように組み合わせるのが効率的であるのかを検討することは、多くの地域の喫緊の課題となっている。このような計画のためには、道路寸断が被災者の搬送に及ぼす影響を考慮する必要がある。

災害時の被災者の搬送は、被災地で医療が必要な患者を選別した後、図 1 のように、重傷者に対して応急治療を行う医療機関に一次搬送し、さらに手術などの治療が必要な重篤者を高度治療を行う医療機関に二次搬送する二段階の方式が一般的である。このような搬送方法に関連する先行研究に小池ら^{1),2)}がある。しかし、それらの研究は、二次搬送、一次搬送を別個に扱っており、重篤者の治療のために一次搬送が特定の病院に集中するのを制限する必要性の検討は行われていない。

本研究では広島県を対象に、4 ケースの大規模地震を想定して、道路や医療機関の耐震構造の強化による効果を評価する手法を提案する。

そのために、被災者を医療機関に搬送する過程をネットワークモデルで表現し、総死亡リスクが最小となるように医療機関の容量の制約内で搬送を行う問題を考える。このモデルで医療機関の容量の低下率や道路の所要時間を変化させて計算することで耐震化の効果を評価する。

2. 緊急搬送計画モデル

(1) 緊急搬送ネットワークモデルの定式化

本研究では重傷以上の負傷者（重傷者、重篤者）を被災地から医療機関に搬送するまでの死亡リスクを最小にするように、なるべく近隣の医療機関へ搬送するような問題を考える。この過程を図 1 のようにネットワークモデルとして表現する。すなわち、各市区町村で発生した重傷者に対して応急治療を行う医療機関に一次搬送し、さらに手術などの治療が必要な重篤者を高度治療を行う医療機関に二次搬送する。対象とする医療機関は県内 18 箇所、県外 3 箇所の災害拠点病院とする。また、各リンクにはノード間の所要時間に応じて死亡リスクが発生し、総死亡リスクが最小となるように被災者をリンクに配分する。

以上のネットワーク配分問題は式 (1) ~ (5) のよ

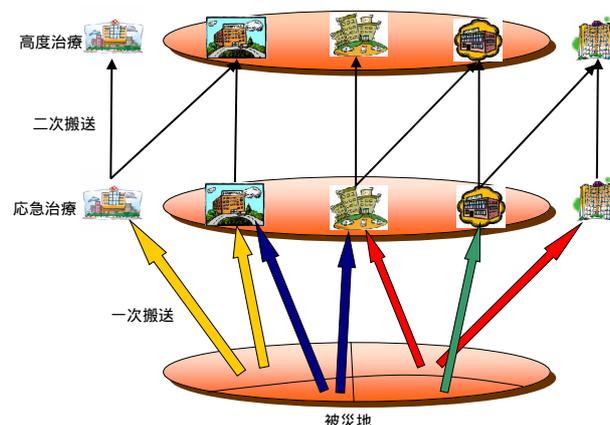


図 1 緊急搬送ネットワーク

Keywords: 緊急輸送, ネットワークモデル, 耐震化

*連絡先: mokmr@cneas.tohoku.ac.jp 022-795-7571

うな線形計画問題として定式化できる。式(1)の第一項は一次搬送時の死亡リスク，第二項は二次搬送時の死亡リスクを表しており，これらの和を最小とるように x_{ij} , y_{jk} を決定する。制約条件の式(2)は各被災地で発生した被災者全員を一次搬送すること，式(3)は一次搬送された重傷者のうち の割合の人が重篤者であるとしてすべて二次搬送することを表している。さらに式(4)は一次搬送されてきた重傷者への治療と二次搬送されてきた重篤者への治療の労力の和が，医療機関の容量を超えないという制約である。この線形計画問題はシンプレックス法によって最適解を求めることができる。

$$\min T = \sum_i \sum_j R_1(t_{ij}^l) x_{ij} + \sum_j \sum_k R_2(t_{jk}^l) y_{jk} \quad (1)$$

$$s.t. \quad \sum_j x_{ij} \geq P_i^l \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_k y_{jk} \geq \beta \sum_i x_{ij} \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_i x_{ij} + \alpha \sum_k y_{kj} \leq \varepsilon_j^l C_j \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$x_{ij} \geq 0, y_{jk} \geq 0 \quad (5)$$

i : 被災地 (市区町村)

j : 応急治療を行う医療機関

k : 高度治療を行う医療機関

l : 想定地震

t_{ij}^l : 想定地震 l における i から j への搬送時間

$R_1(t_{ij}^l)$: i から j への一次搬送時の死亡リスク(確率)

$R_2(t_{jk}^l)$: j から k への二次搬送時の死亡リスク(確率)

P_i^l : 想定地震 l により被災地 i で発生する重傷者数

x_{ij} : 被災地 i から医療機関 j への一次搬送数

y_{jk} : 医療機関 j から k へ二次搬送される重篤者数

：高度治療の労力の重み

：重傷者数に対する重篤者数の割合

ε_j^l : 想定地震 l 発生時の医療機関 j の容量残存率

C_j : 医療機関 j の受け入れ労力の上限值

(2) 死亡リスク関数の定式化

本研究では搬送に要する時間が長いほど患者の死亡確率が高くなると考え，式(6)で近似されるカーラーの救命曲線を用いる。一次搬送時の重傷者の死亡リスク関数にはこの値を適用する。二次搬送においては重篤者を他の医療機関に転送することには危険性を伴う。そこで，二次搬送時の死亡リスクとし

て，応急治療を行った医療機関でそのまま高度治療を行う場合には 0 とし，他の医療機関に転送する場合にはカーラーの救命曲線の値に加えてさらに a というペナルティを加えた式(7)を用いる。

・一次搬送時の死亡リスク関数

$$R_1(t_1) = -3 \times 10^{-7} t_1^5 + 9 \times 10^{-5} t_1^4 + 9.9 \times 10^{-3} t_1^3 + 4.4 \times 10^{-1} t_1^2 - 5.8 t_1 + 23.55 \quad ; 10 < t_1 < 70$$

$$R_1(t_1) = 0 \quad ; t_1 \leq 10, R_1(t_1) = 100 \quad ; 70 \leq t_1 \quad (6)$$

・二次搬送時の死亡リスク関数

$$\text{他機関に転送する場合 ; } R_2(t_2) = R_1(t_2) + a \quad (7)$$

$$\text{転送しない場合 ; } R_2(t_2) = 0$$

3 . 広島県の緊急搬送能力の現状

(1) 使用データ

本研究では広島県を対象に県内の 18 + 県外の 3 災害拠点病院への搬送を考える。その際以下のデータを使用する。

(a) 重傷者数

本研究では，安芸灘・伊予灘の地震，己斐断層の地震，小方-小瀬断層の地震，中央構造線の地震の 4 つの想定地震についての分析を行う。各想定地震による重傷者数は，「広島県地震被害想定調査報告書」³⁾によって推定された値を用いる。

(b) 二次搬送される患者の割合

一次搬送された患者数に対する二次搬送する患者数の割合 の値は，阪神大震災における重傷者に対する重篤者数⁴⁾を基に 0.17 とした。

(c) 搬送時間

広島県土木建築部の道路交通網データを使用する。このデータは 2957 の幹線道路リンクについて，平常時の所要時間を含んでいる。このデータを使用し，ダイクストラ法によって 93 市区町村 - 21 医療機関間，21 医療機関 - 21 医療機関間の最短交通時間を求め，一次搬送時間，二次搬送時間とした。ただし，地震の発生により被害が想定される地域のリンクの所要時間は一律 3 倍と設定した。

(d) 医療機関の容量

本研究では，「山梨県東海地震被害想定調査」⁵⁾に記載されている市町村ごとの病床数と対応可能外来患者数に基づき，地震前の患者の受け入れに要する労力の限界値(容量)を「病床数 × 1.5」とした。

地震後には医療機関の被災により能力が低下することを考慮するため、これに残存率 ϵ_j' を乗じる。残存率の値は「広島県地震被害想定調査報告書」³⁾の重要施設の機能支障評価結果一覧表より、医療機関が存在する市ごとに一部または全部の機能が利用できる施設数の占める割合を求め、その値を用いる。なお、県外の 3 医療機関については、地震による被害は無いものと考え、残存率は 1 に固定した。

(e) その他のパラメータ

重傷者への応急治療に対する重篤者への高度治療の労力の比率を意味する、高度医療機関の仕事量の重み α 、および、二次搬送時の固定死亡リスク a には十分な知見が無く、確定的な値が設定できない。そこで感度分析より、他医療機関への二次搬送者数が現実的な値となるように $a = 3$ 、 $\alpha = 2$ と設定した。

(2) 最適緊急搬送パターン

ここでは現在広島県で実行可能な搬送パターンを求めて考察を行う。表 1 にそれぞれの想定地震によって発生する被災者数と総死亡リスクを示す。重傷者が多い地震はその比率以上に死亡リスクが高くなっている。これは、重傷者が多いほど容量が不足する医療機関が多くなるため緊急搬送の効率が悪くなり搬送中の死亡確率が高まるためである。

図 2 は 4 つの想定地震における各医療機関の容量と治療の労力を表している。安芸灘・伊予灘の地震では、広島市でやや容量が逼迫しているものの、容量不足の発生は一カ所のみで、周辺の医療機関で十分カバーできる。己斐断層の地

表 1 被災者数と最適搬送下での死亡リスク

想定地震	即死者数	重傷者数	二次搬送数	平均死亡確率	想定死亡数
安芸灘・伊予灘地震	647	2,773	0	0.03	75
己斐断層の地震	1,085	3,338	11	0.11	369
小方 - 小瀬断層の地震	973	5,500	24	0.2	1,089
中央構造線の地震	1,196	7,087	91	0.24	1,714
	参考文献における推定		本研究による計算値		

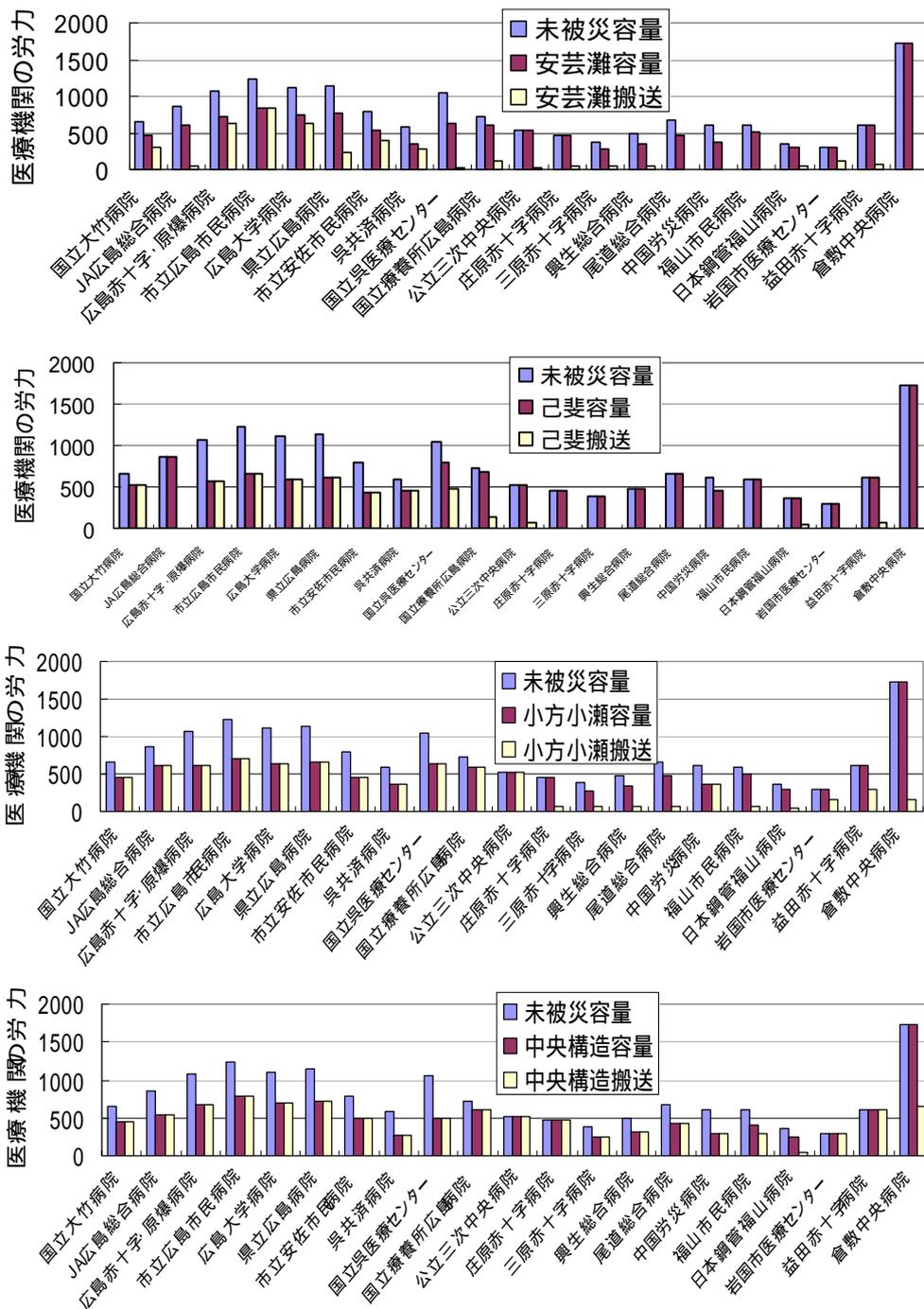


図 2 4 つの想定地震における医療機関の容量と治療労力

震では、被害が広島市に集中するため、広島市内の全ての医療機関で容量不足が生じる。そのため、呉市の医療機関にも搬送され、呉共済病院でも容

量不足が生じる。小方-小瀬断層の地震では広島市・呉市・大竹市・福山市と広範囲にわたる被害が予想され、安芸灘・伊予灘の地震の約 2 倍の重傷者が想定されている。そのため各地の医療機関で容量不足が生じ、岡山の倉敷中央病院にも搬送されている。中央構造線の地震では、広島市・呉市・福山市・三原市・尾道市と被害は広範囲にわたり、想定重傷者数の合計も想定 4 地震中もっとも多い。そのため、福山市を除く県内全域での容量不足に加えて、県外でも容量不足が生じる。

4. 道路と医療施設の耐震化の影響評価

本研究では、(a)現状の死亡リスクに対して、(b)全ての医療機関を耐震化した場合、(c)全道路を耐震化した場合、および(b+c)全医療機関と道路を耐震化した場合の効果を分析する。なお、医療機関の耐震化により地震による容量低下が起こらなくなり、道路の耐震化により寸断・渋滞が一切起こらず平常時と同じ交通時間で搬送できるようになると仮定する。計算結果を表 2 にまとめている。

まず、(b)医療機関の耐震化による死亡リスクの減少率を見ると、安芸灘・伊予灘の地震では耐震化の影響が小さい。これは、耐震化前にすでに各被災地の患者を最近隣の医療機関でほぼカバーできていることに起因している。一方、他の 3 ケースは耐震化後の総死亡リスクが大幅に低くなっている。これは、耐震化前は医療機関の容量が足りなくなり、遠方の医療機関に搬送していたが、耐震化により長距離の搬送が必要なくなったためである。

次に(c)道路耐震化の効果をみると、4 つの地震とも、道路耐震化後には総死亡リスクが減少している。これは耐震化前は地震による交通時間の増大により、最近隣医療機関に短時間で搬送できていないことを表している。特に、耐震化によって安芸灘・伊予灘の地震と己斐断層の地震では 1/5 以下にまで総死亡リスクを削減できている。

さらに、(b+c)医療機関と道路の双方に耐震化を施す効果を考察する。安芸灘・伊予灘の地震のケースでは(c)道路の耐震化と同等の効果しか得られていない。残りの 3 地震では医療機関または道路のどちらかを耐震化する場合に比べ総死亡リスクはかな

表 2 医療機関と道路の耐震化の効果

想定地震	A現状	B医療機関耐震	C道路耐震	B+C両方耐震
安芸灘・伊予灘地震	75 (100)	74 (99)	13 (17)	13 (17)
己斐断層の地震	369 (100)	110 (30)	41 (11)	3 (1)
小方-小瀬断層の地震	1,089 (100)	175 (16)	391 (36)	21 (2)
中央構造線の地震	1,714 (100)	733 (43)	882 (51)	202 (12)

り小さくなっている。特に己斐断層の地震と小方-小瀬断層の地震ではそれぞれ耐震化前の 1/10 以下、1/8 以下と、追加的な耐震化による死亡リスクの削減効果は著しい。

中央構造線の地震以外の 3 ケースでは全医療機関と全道路の双方を耐震化することは、それぞれの耐震化効果を加算したものに比べてかなり小さく、効率的とはいえない。この 3 ケースでは、医療機関と道路のそれぞれの中から、耐震化効果の高い施設や区間を抜き出して耐震化を実行すれば効率的である。例えば、安芸灘・伊予灘の地震以外の 3 ケースで容量が逼迫する広島市の医療機関を優先的に耐震化することや、全ケースで被害が想定される広島市の道路や 3 ケースで被害が想定される呉市の道路を優先的に耐震化することが考えられる。

5. 結論と今後の課題

本研究では耐震化の影響を評価できるツールを提案し、広島県を対象に道路と医療機関の耐震化効果を分析した。これより、全ての道路と全医療機関の双方を耐震化することは非効率的であることがわかった。本研究で用いた線形計画モデルでは、双対変数の値を精査することにより、死亡リスクの削減に効果がある OD を知ることが出来る。それと最短経路を重ね合わせることによって、耐震効果の高い路線を明らかにすることが今後の課題である。

参考文献

- 1)小池則満, 秀島栄三, 山本幸司: 航空事故等緊急災害時における傷病者搬送計画に関する基礎的考察, 土木計画学研究・論文集, vol.16, pp.371-376, 1999
- 2)小池則満, 宇治和幸, 秀島栄三, 山本幸司, 深井俊英: 震災時における傷病者行動特性と搬送計画に関する一考察, 土木計画学研究・論文集, vol.18, pp.325-330, 2001.
- 3)広島県: 広島県地震被害想定調査報告書, 1996.
- 4)国土庁: 平成 7 年兵庫南部地震緊急実態調査, 1996.
- 5)山梨県: 山梨県東海地震被害想定調査第 9 編, 2005.