

# 地震重傷者搬送における道路ネットワーク維持の効果分析\*

## Analysis of Effect on Road Network Maintenance, Considering Transportation of Seismic-Proof Injured People \*

佐々木和寛\*\*・奥村誠\*\*\*・堀内智司\*\*\*\*

By Kazuhiro SASAKI\*\*・Makoto OKUMURA\*\*\*・Satoshi HORIUCHI

### 1. はじめに

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。筆者らは道路網と医療施設の耐震化を総合的に比較して大規模地震直後の被災者搬送中の死亡リスクを最小化するような数理計画モデルを提案している<sup>1)</sup>。しかしここでは、きわめて小規模な例題ネットワークでのみ計算を行っており、実用的な規模の問題への適用が課題として残されていた。本研究では、近い将来高い確率で宮城県沖地震の発生が想定されている宮城県を対象に前稿のモデルを当てはめ、道路施設と医療施設の効果的な耐震化のあり方を検討する。さらに、高速道路の維持が一般道や医療施設の耐震化に与える影響を分析する。

### 2. 最適耐震化問題

我々が解くべき問題は、耐震化のための総費用が予算額  $B$  を超えないという制約のもとで、重傷者搬送中の死亡リスクを最小化するように、耐震化すべき道路リンクと救急医療施設の組み合わせを求めることである。このとき、被災パターンの発生の不確実性への考え方により、2つのモデルを提案できる。

#### (1) 死亡リスクの期待値を最小化する耐震化計画

各被災パターン  $h \in H$  の発生確率  $\phi^h$  が与えられている状況を考える。被災パターン  $h \in H$  において、居住ゾーン  $i \in I$  で発生した重傷者  $P_i^h$  の搬送に対してリンク  $k \in \bar{K}$  を用いる人数を表現する変数  $x_{ik}^h$  を導入し、死亡リスクの死亡確率にカーラー救命曲線の線形近似式<sup>1)</sup>を用いると、死亡リスクの期待値を最小化する問題は以下のような混合整数計画問題として定式化できる。

\*キーワードズ：防災計画，計画手法論

\*\*学生会員，東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

(E-mail: k-sasaki@cneas.tohoku.ac.jp)

\*\*\*正会員，博(工)，東北大学東北アジア研究センター

(仙台市青葉区川内41番地，

TEL022-795-7571, FAX022-795-7477,

E-mail: mokmr@cneas.tohoku.ac.jp)

\*\*\*\*正会員，修(工)，国土交通省

$$\min_{x,Y,Z} W_\phi = \sum_h \phi^h \sum_{i \in I} g\left(\sum_{k \in K} d_k^h x_{ik}^h\right) \quad (1)$$

$$s.t. \sum_i x_{ik}^h \leq S_k^h + \Delta S_k^h Z_k \quad \forall k \in K, \forall h \in H \quad (2)$$

$$\sum_i x_{ij}^h \leq Q_j^h + \Delta Q_j^h Y_j \quad \forall j \in J, \forall h \in H \quad (3)$$

$$\sum_k c_k Z_k + \sum_j e_j Y_j \leq B \quad (4)$$

$$Z_k = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$Y_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{k \in L_i} x_{ik}^h \geq P_i^h \quad \forall i \in I, \forall h \in H \quad (7)$$

$$\sum_{k \in M_j} x_{ik}^h \geq P_i^h \quad \forall i \in I, \forall h \in H \quad (8)$$

$$\sum_{k \in L_a} x_{ik}^h = \sum_{k \in M_a} x_{ik}^h \quad \forall a \in A - \{i\}, i \in I, h \in H \quad (9)$$

$$0 \leq x_{ik}^h \quad \forall i \in I, \forall k \in \bar{K}, \forall h \in H \quad (10)$$

ただし、被災パターン  $h \in H$  のもとでの道路交通容量を  $S_k^h$ 、救急医療施設  $j \in J$  の受け入れ可能重傷者数を  $Q_j^h$ 、リンクの所要時間を  $d_k^h$  と表現する。 $Z_k$  は道路リンク  $k \in K$  の耐震化の実施の有無を表現する0-1変数であり、その費用は  $c_k$  である。 $\Delta S_k^h$  はその実施による交通容量の増加分を示す。また、 $Y_j$  は医療施設  $j \in J$  の耐震化実施の有無を表現する0-1変数であり、その費用は  $e_j$  である。 $\Delta Q_j^h$  はその実施による受け入れ可能重傷者数の増加分を示す。 $A$  は居住地セントロイド  $i \in I$ 、医療施設の近隣交差点ノード  $j \in J$ 、救急医療の終了を示す仮想ノード  $f$  で構成されるノード集合、 $\bar{K}$  は道路リンク  $k \in K$ 、医療施設使用ダミーリンク、時間超過ダミーリンクを含むリンク集合である。 $g$  はカーラー救命曲線の線形近似式の勾配である。

#### (2) 最悪の被災パターンの下での死亡リスク最小化する耐震化計画

発生する被災パターンが不明である以上は、安全面を考え、最も大きな死亡リスクを与えるような最悪の被災パターンを想定し、その死亡リスクを最小化する問題(ミニマックス問題)を考える。死亡リスク関数にカーラー救命曲線の線形近似式<sup>1)</sup>を適用し、先の問題の目的関数(1)式を以下のように置き換え、(2)式から(10)式までの制約条件をそのまま用いると、この問題も混合整数計画問題として定式化できる。

$$\min_{W,x,Y,Z} W \quad (11)$$

$$s.t. W \geq \sum_{i \in I} g \left( \sum_{k \in K} d_k^h x_{ik}^h \right) \quad (12)$$

本研究では、GNUフリーウェアである線形計画法の計算パッケージglpkのver4.8を用いて計算を行った。

### 3. 宮城県における耐震化問題の設定

#### (1) 計算対象ネットワーク

平成 16 年における宮城県の市区町村に対応した居住地ゾーンの 66 個のセントロイド、12 個の災害拠点病院、18 個の IC で構成される合計 96 個のノードを設定し、県指定の緊急輸送道路を参考に設定した 312 個の有向リンクを加えて道路ネットワークをモデル化した。さらに、この道路ネットワークに 1 個の仮想ノードと、12 個の医療施設使用ダミーリンク、IC 以外のノードを起点とする 78 個の時間超過ダミーリンクを加えた、ノード数 97、リンク数 402 のネットワークを用いて計算する。

#### (2) 被災パターンと発生確率

宮城県では、宮城県沖地震の 2 つの型のうち被害の大きい連動型と、利府長町断層地震の地震が同程度の確率  $\phi^h = 0.5$  で発生すると仮定する。

#### (3) 重傷者数

「宮城県第3次地震被害想定調査」<sup>4)</sup>に掲載されている夏の昼間の想定重傷者数を用いた。宮城県沖地震では図1中の灰色の数字のように、石巻の98名、仙台市宮城野区の60名を筆頭に、大崎、涌谷、河南といった広域に総計585名の重傷者が発生する。一方、長町利府断層地震の総重傷者数は880名と多いが、図2中の灰色の数字のようにその発生場所は仙台市の各区に集中している。

#### (4) 受け入れ可能重傷者数

災害時の受け入れ可能重傷者数は、病床数に空床率<sup>5)</sup>を乗じた通常時の受け入れ可能重傷者数に、1 から建物災害被害率<sup>4)</sup>を引いた値とライフライン機能低下による医療機能維持率を乗ずることで算出した。ライフライン機能低下に対する医療機能維持率は、計測震度が 5 未満では 70%、5 以上 5.5 未満では 60%、5.5 以上 6 未満では 50%、6 以上では 40%と設定した。以上の設定

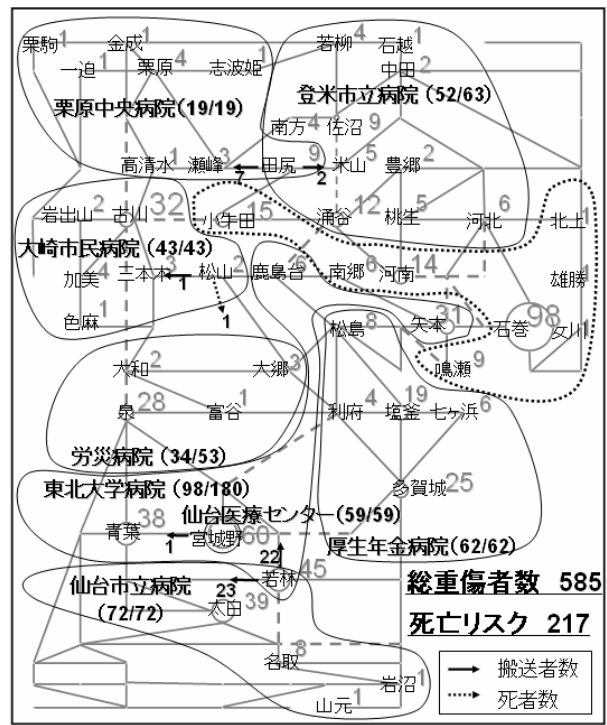


図1 宮城県沖地震の被害設定と最適搬送

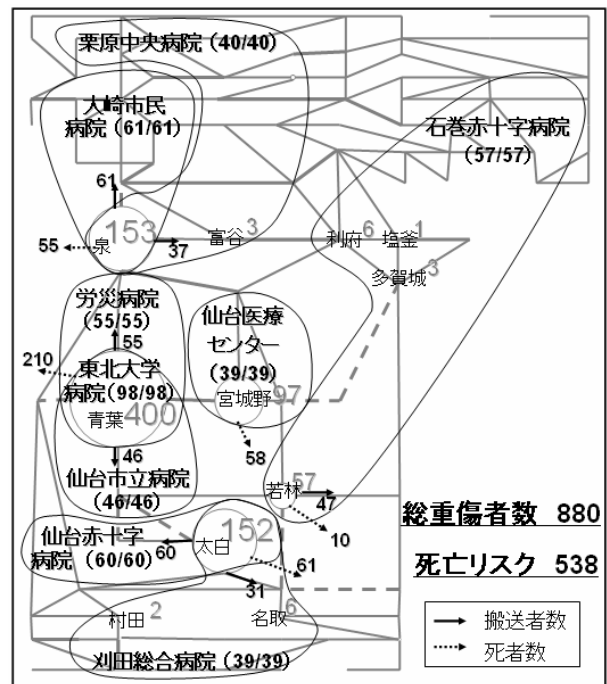


図2 長町利府断層地震の被害設定と最適搬送

を表1にまとめる。

#### (5) 所要時間

各道路リンクの距離を、地図検索 HP“マピオン”の“キロリ測”を用いて計測した。震災後の通行可能速度は、道路種別ごとにその道路区間の最大計測震度の想定値に対応させる形で表2のように設定した。最後に道路区間距離を設定した速度で除して、所要時間を算出した。

#### (6) 途絶する道路区間

2 つの地震について、計測震度が 6 以上で川幅 20m

表1 医療施設の受け入れ可能重傷者数と耐震化費用

医療施設名	通常時の受け入れ可能重傷者数	宮城県沖地震発生時の受け入れ可能重傷者数	長町利府断層地震発生時の受け入れ可能重傷者数	延床面積 (m <sup>2</sup> )	耐震化費用 (億円)
立刈田総合病院	55	17	17	20	10
仙台医療センター	160	84	100	45	23
仙台市立病院	120	48	74	34	17
大 病院	300	120	201	85	42
仙台 病院	98	40	59	28	14
仙台 病院	129	66	93	36	18
生 病院	111	59	56	32	16
大崎市立病院	81	41	24	30	15
市立 中 病院	87	44	26	19	9
登米市立佐沼病院	130	67	39	19	10
石巻 病院	56	37	17	25	13
立 仙沼総合病院	54	16	16	29	15

表2 道路の旅行速度の設定

		道路区間の最大計測震度想定値					
		4.5	5	5.5	6	6.5	7
道路種別	高速	80	80	60	60	40	40
	国道	60	60	45	45	30	30
	県道	40	40	30	30	20	20

以上の河川を跨ぐ橋が存在する箇所を選定した。宮城県沖地震では17個の道路区間が、長町利府断層地震では8個の道路区間が途絶するとし、図1, 2の破線で示す。

#### (7) 道路の耐震化

道路の耐震化は、(6)で設定したすべての途絶区間で実施可能で、耐震化により両方向とも通常時の所要時間で通行可能になると仮定する。耐震化費用は、愛媛県の政策事務事業評価表<sup>6)</sup>の橋梁補修事業分野に示された総事業費と事業総数から求めた平均橋梁補修費を参考として、すべての道路区間で1億円と設定した。

#### (8) 医療施設の耐震化

病院が保持している病床数に、1病床あたりの延床面積<sup>7)</sup>と1m<sup>2</sup>あたりの耐震化費用<sup>8)</sup>を乗じることで耐震化費用を算出する。以上の設定を表1の右欄に示す。

#### (9) カーラーの救命曲線の線形近似式

前稿<sup>1)</sup>では、カーラー救命曲線を線形近似しており、搬送時間 $t$ が0分で死亡確率が0、搬送時間 $t$ が70分以上では死亡確率が1とし、 $g = 1/70$ と設定した。

### 4. 最適搬送パターンと最適耐震化政策

#### (1) 現在の施設における最適搬送

先のモデルで耐震化の総予算を $B = 0$ として問題を解くことにより、現在の施設のままで最も死亡リスクを小さくする重傷者の搬送パターンを求めることができる。図1と図2に計算結果を示す。図中の実線で囲まれた領域は、各医療施設が治療を担当する地域であ

り、施設名の傍に利用率を示した。さらに、実線の矢印は居住地から搬送される重傷者数を、点線の矢印は搬送が行われない重傷者数を示す。

図1の宮城県沖地震では、各医療施設がその近隣地域で発生する重傷者を受け入れている。また、重傷者が大勢発生する石巻を中心とする点線で囲まれた地域では、搬送可能な医療施設での受け入れ容量が足りない、もしくは、受け入れる余裕がある最寄り医療施設へ搬送するのに時間が掛かり過ぎてしまうため、重傷者を搬送できない。一方、図2に示した長町利府断層地震では、仙台市内で集中的に発生する重傷者を市内と遠方の医療施設へ搬送している。刈田総合病院等の遠方の医療施設への搬送には有効的に高速道路が使用されているが、高速道路が未整備である登米市立佐沼病院には、時間が掛かり過ぎるため搬送されない。

#### (2) 予算制約の変化による最適耐震化戦略の変化

先に述べた2つのモデルにおいて耐震化の総予算 $B$ を17億円まで1億円刻みで増やし計算した結果を表3に示す。ただし、この予算の範囲で耐震化が行われなかった道路リンクと医療施設は表示していない。

死亡リスクの期待値最小化問題では、病院の耐震化が行われる前後で道路の耐震化の順番が変化している。すなわち、耐震化された病院へアクセスする道路が優先されて耐震化される。具体例として、大崎市民病院の耐震化前後の道路の耐震化のパターンを比較すると、病院の耐震化前(予算が5億円から7億円)では、涌谷・米山の重傷者を登米市立佐沼病院へ運ぶための道路区間「涌谷-米山」、「米山-迫」が耐震化されているのに対し、耐震化後(予算14億円から16億円)では小牛田や河南から大崎市民病院へ重傷者を運ぶ道路区間「古川-小牛田」が優先的に耐震化されている。

表3 予算制約の変化に伴う耐震化戦略の変化 (医療施設名の数値はその施設の耐震化費用)

予算制約	死亡リスクの期待値の最小化問題																	最悪被災パターンの死亡リスクの最小化問題																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
死亡リスク	372	360	349	345	339	336	335	333	331	330	329	329	328	324	323	321	319	506	483	481	477	475	474	474	474	474	469	466	463	460	450	428	425	
長町-若林	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
長町-若林JCT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
仙台赤十字-市立病院	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
太白-市立病院	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
仙台宮城-青葉	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
若竹-厚年病院	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
厚年病院-多賀城	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
泉-大和	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
大和-古川	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
奥鳴瀬-鳴瀬	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
大街道-石巻河南	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
石巻河南-石巻赤十字	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
石巻赤十字-河北	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
古川-小牛田	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
涌谷-米山	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
米山-迫	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
仙台医療センター(14)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
大崎市民病院(9)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

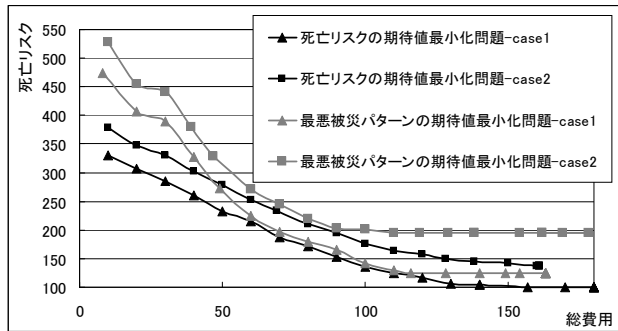


図3 それぞれのモデルにおけるCase1とCase2の比較

また、最悪被災パターンの死亡リスク最小化問題において、17億円までの範囲ではより被害の大きい長町利府断層地震の対策が優先して行われる。1億円から7億円までは道路が耐震化されることで死亡リスクは低下しているが、8億円から10億円までは道路の耐震化が死亡リスクの改善につながっていない。

### 5. 高速道路の利用可能性の影響分析

地震発生直後、高速道路は亀裂や落橋の発生の有無を確認するまで、通行が制限されるため、一定時間通行できない状況が起こる。今後、被災後の検査方法を改善し、通行制限時間を短縮することの効果を検討したい。そのため、これまでの橋梁区間を除くすべての高速道路区間が被災直後から利用可能であるという設定 (Case1)と、これにすべての高速道路は重傷者の搬送に意味がある70分間の間は使用不可能であるという条件を加えた設定 (Case2)で求められる計算結果に対し、同じ死亡リスクを実現するのに必要な総費用を比較する。

Case1とCase2で耐震化の総予算  $B$  の値を10億円ずつ230億円まで増加させて計算を行った結果を図3に示す。

死亡リスクの期待値最小化問題では、死亡リスクが320人から220人の間の値を実現するように耐震化すると、Case1はCase2より総費用は約20億円小さくなっている。死亡リスクが170から140の間の値では、目標の死亡リスクが低いほど、Case1とCase2の総費用の差は大きくなり、削減額は30~65億円である。これは、高速道路を使うこ

とでのみ到達可能な石巻赤十字病院への搬送が可能になることが死亡リスクの削減に効果的に働くためと考えられる。

最悪被災パターンの死亡リスク最小化問題では、死亡リスクが390人から250人の間の値を目標とする場合、Case1はCase2より総費用を7~15億円小さくできる。また、死亡リスクが250人から200人の間の値では目標とする死亡リスクが低いほど、Case1の投資削減額は大きくなる。これも、石巻赤十字病院の搬送が可能になったことが原因であると考えられる。

### 6. おわりに

本論文では、前稿で提案した最適耐震化計画モデルを宮城県に適用した。予算の増加に伴う最適な耐震化計画の変化に着目すると、医療施設の耐震化前後で道路の耐震化の優先順位は異なり、両者の耐震化を連携して考える必要性が確認できた。さらに、地震発生直後に高速道路が使用できると、一般道と医療施設の耐震化の総費用を削減できることが確認された。

本研究の実施にあたり、高速道路関連社会貢献協議会の平成20年度研究助成金を活用した。感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 奥村誠, 堀内智司: 大規模地震被災者搬送のための道路・医療施設耐震化計画モデル, 土木計画学研究・講演集, No.38, CDR0M125, 2008.
- 2) Church,R.L., Scaparra, M.P., and Middleton,R.: The r-interdiction Median Problem and the r-interdiction Covering Problem, Annals of the Association of American Geographers, 94,pp.491-502, 2004
- 3) Church, R.L. and Scaparra, M.P.: Protecting Critical Assets: The r-interdiction Median Problem with Fortification, Geographical Analysis, 39, pp.129-146, 2007.
- 4) 宮城県, 第3次地震被害想定調査, 2005年
- 5) 厚生労働省, 病院報告, 2007年
- 6) 愛媛県, 愛媛県事業事務評価表, 2007年
- 7) 厚生労働省, 医療施設調査, 2005年
- 8) 建築コスト管理システム研究所, 「耐震改修工法」の調査報告, 建築コスト研究, No59, 2007年