

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*

Optimal Seismic-Proof Reinforcement Planning, Considering Transportation of Injured People*

奥村誠**・堀内智司***・佐々木和寛****

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

1. 本研究の目的と既存研究

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できない。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、医療機関の耐震化と道路の整備の効果的な組み合わせを検討することは、多くの地域の喫緊の課題となっている。そのためには、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。

従来から、災害時などの道路の寸断の可能性を踏まえて交通サービスの信頼性を評価する方法について多数の研究が蓄積されており、その概要は倉内ら¹⁾に簡潔にまとめられている。震災直後では迅速に被災者などを搬送できるかという物理的な連結性が問題になり flow independent な状況を想定すればよいのに対して、数日後からは通常時の交通分布や経路選択のパターンと整合するサービスが提供できるかが問題となり、flow dependent な状況を考慮する必要が生じる²⁾。そのような選択行動を前提とした耐震化の便益評価についても研究がなされつつある³⁾。一方で、震災直後の医療施設への搬送の実態を踏まえて、施設をいかに有効に活用するかという視点に立った分析も行われている⁴⁾。

道路ネットワークと医療施設の組み合わせに着目したものとして、筆者らは震災により受け入れ能力が低下した医療施設への重傷者搬送問題を取りあげ、死亡リスクを最小化するような搬送の割り当てを、線形計画モデルとして定式化した⁵⁾。しかしながら、道路施設の被災の影響を考える上では、同モデルの係数を外生的に操作しながら繰り返し問題を解く必要があり、最適な耐震化案を得ることは困難であった。

近年、施設利用に関わる移動コストを最小化する数理計画問題において、人為的なテロや自然災害により一部の施設の機能が停止することの影響把握⁶⁾や、確率が不明な Knight 流の不確実性であるテロや自然災害に対応する防衛策を最適化する問題の提案⁷⁾が行われている。この種の不確実性への対応はミニマックス問題として定式化できることが示されており⁸⁾、交通分野においても Bell⁹⁾、長江ら¹⁰⁾は危険物輸送が有する低頻度・大損害特性を考慮できるミニマックス輸送計画問題を分析している。

本研究はこれらの定式化を参考にして、道路網の耐震化と医療施設の耐震化を整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の提案を行う。提案するモデルは少数の 0-1 変数を含む混合整数計画問題となっている。本研究は震災直後の状況を想定するものの、あくまでも、地震が発生する前の段階で道路施設と医療施設の耐震化を長期的な視点から分析するものであり、震災発生後に重傷者をどのように搬送すべきか決めるための研究ではない。

本研究では宮城県における震災対策検討のための既存データにこのモデルの適用を行い、都道府県レベルの防災計画担当者が直面する規模の問題が既存の数理計画法のパッケージにより実用的な時間で計算可能であることを示す。このケーススタディーでは、実際のデータが収集できない部分については仮想的な設定を行っており、モデルから出力される耐震化案の結果は妥当性を持つわけではない。しかし、実用的な規模の問題にもモデルが適用可能であることを示すという本研究の目的にはなっているものと考えられる。

*キーワード：防災計画，計画手法論

**正会員，博（工），東北大学東北アジア研究センター
〒980-8576 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），独立行政法人土木研究所
道路技術研究グループ 舗装研究チーム
(E-mail: s-horiuchi@pwri.go.jp)

****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)

2. 耐震化問題の設定

(1) 計算対象のネットワークと救急医療施設

対象地域において、 $|A|$ 個のノードと $|K|$ 個の有向リンクからなる道路ネットワークを考える。ノードのうち $|I|$ 個は居住ゾーンを代表するセントロイドである。ノード $a \in A$ に流入するリンクの集合を M_a で、流出するリンクの集合を L_a と表す。一方、地域内には $|J|$ 個の救急医療施設が存在する。

この地域において異なるタイプの地震が $|H|$ 種類想定されており、被災パターン $h \in H$ によって各居住ゾーン $i \in I$ で P_i^h 人の重傷者が発生するとともに、道路リンクの一部が被災して交通容量が低下すると想定されている。この被災パターン $h \in H$ のもとでの道路交通容量を変数 S_k^h で与え、リンク所要時間を d_k^h で与える。リンク所要時間 d_k^h は、先に述べた本研究の目的を考え、OD需要の増加による所要時間の増加を考えない flow independent な設定を用いるが、途絶による所要時間の増加のみは想定することとする。そのため、橋梁の落下などが予想される場合には被災時の交通容量が0であると仮定することで途絶を表現する。

震災発生直後に、各居住ゾーンで発生した重傷者を、通行可能な道路リンクを辿って近隣の救急医療施設に運ぶ。各施設の容量制約の値は被災パターンにより異なっており、被災パターン $h \in H$ のもとでの救急医療施設 $j \in J$ の受け入れ可能重傷者数を Q_j^h とする。

救急医療施設への重傷者搬送中の死亡確率は、カーラーの救命曲線と呼ばれる所要時間 t に対するSカーブ状の関数 $g(t)$ で与えることができる⁵⁾。本研究では数理的な取り扱いを容易にするためにこの関数を以下のような折れ線で近似し、所要時間の線形関数として扱う。

$$g(t) \approx \begin{cases} 0 & (t < t_1) \\ g \cdot (t - t_1) & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ 1 & (t_2 < t) \end{cases} \quad (1)$$

(2) 計画問題の内容

ここでは道路リンクの耐震化と救急医療施設の耐震化という2種類の政策を実行できると仮定する。道路リンク $k \in K$ の耐震化には c_k の費用を要するが、その実施により被災パターン $h \in H$ のもとでの交通容量を ΔS_k^h だけ増加させることができる。この道路リンク耐震化の実施の有無を、0-1変数である Z_k で表現する。一方、救急医療施設 $j \in J$ の耐震化には e_j の費用を要するが、その実施により被災パターン $h \in H$ のもとでの受け入れ可能重傷者数を ΔQ_j^h だけ増加させることができる。この救急医療施設耐震化の実施の有無を、0-1変数である Y_j で表現する。

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について不確実性があるため、以下のような2つの考え方を取ることができる。

- それぞれの被災パターン $h \in H$ の発生確率 ϕ^h について何らかの科学的根拠に基づいて県などの機関が公表している値が利用できる状況を考え、死亡リスクの期待値を最小化する問題を解く。
- 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）を解く。

本研究では、以上の2つの考え方に対する数理計画問題を定式化することとする。

3. 最適耐震化問題の定式化

(1) 定式化のための準備

交通流と救急医療施設の利用をひとつのネットワーク上で整合的に扱うため、道路ネットワークに救急医療の終了を意味する1つの仮想ノード f と、それにつながる2種類の仮想リンクを付け加える。

1つは救急医療施設の利用を表す仮想リンク（医療施設使用リンク） $j \in J$ で、施設に隣接する交差点ノードから仮想ノード f に向けて移動時間 $d_j^h = 0$ のリンクを設定する。なお、医療施設で重傷者の受け入れに当たって一定の所要時間を必要とする場合には、その値を仮想リンクの移動時間として設定すればよい。第2は居住地域の孤立や近隣の病院の容量制約などが発生して、救命が期待できる時間内 ($t \leq t_2$) に救急医療施設に輸送できない重傷者が発生することを表現するための仮想リンク（時間超過リンク）である。居住地域のセントロイド $i \in I$ から仮想ノード f に向けて移動時間 $d_i^h = t_2$ を持つリンクを設定する。これらの仮想リンクを含めたリンク集合を以下では $\bar{K}$ と表現する。

(2) 死亡リスクの期待値を最小化する耐震化政策

被災パターン $h \in H$ において、居住ゾーン $i \in I$ において発生した重傷者 P_i^h の輸送に対してリンク $k \in \bar{K}$ を用いる人数を表現する変数 x_{ik}^h を導入することにより、死亡リスクの期待値を最小化する問題は以下のような数理計画問題として定式化できる。

$$\min_{x, Y, Z} W_\Phi = \sum_{h \in H} \phi^h \sum_{i \in I} g \left(\sum_{k \in \bar{K}} d_k^h x_{ik}^h \right) \quad (2)$$

s. t.

$$x_{ik}^h \leq S_k^h + \Delta S_k^h Z_k \quad \forall k \in K, \forall i \in I, \forall h \in H \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij}^h \leq Q_j^h + \Delta Q_j^h Y_j \quad \forall j \in J, \forall h \in H \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} c_k Z_k + \sum_{j \in J} e_j Y_j \leq B \quad (5)$$

$$Z_k = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$Y_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall j \in J \quad (7)$$

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

$$\sum_{k \in M_f} x_{ik}^h \geq P_i^h \quad \forall i \in I, \forall h \in H \quad (9)$$

$$\sum_{k \in L_a} x_{ik}^h = \sum_{k \in M_a} x_{ik}^h \quad \forall a \in A - \{i\}, \forall i \in I, \forall h \in H \quad (10)$$

$$0 \leq x_{ik}^h \quad \forall i \in I, \forall k \in \bar{K}, \forall h \in H \quad (11)$$

目的関数の(2)式は、居住地ごとに救急医療施設までの搬送時間を通過リンクの所要時間を用いて求め、そこから死亡リスクに換算した上で重傷者数に乗じるという計算を、死亡リスクの線形性に着目して別の順序で計算している。すなわち、居住地ごとの重傷者の総搬送時間から総死亡リスクに換算し、その値を被災パターンごとの発生確率で重み付けをして、期待値を求めている。(1)式のように折れ線近似を行うと、この問題は定数係数の混合整数計画問題となり、整数変数の個数が少ないことから一般の線形計画法のパッケージで実用解を得ることが可能となる。

(3)式は道路リンクの容量に関する制約、(4)式は救急医療施設の容量に関する制約で、いずれも耐震化の実施により緩和されることを表している。(5)式は複数の耐震化を行う際の予算制約式である。(6)式と(7)式は、耐震化の決定はそれを行うか、行わないかという二者択一的な決定であることを示している。

(8)式で居住ゾーンごとにすべての重傷者が搬送計画の対象となることを保障する。(9)式は居住ゾーンごとの重傷者がいずれかの救急病院に搬送されるという条件であるが、救命が可能な時間 t_2 内で搬送できない場合には、搬送をあきらめることを認めている。本モデルではその人数が時間超過を表す仮想リンクの変数値 x_{ii}^h として算出されるので、その上限値に関する制約を設けたり、目的関数に仮想リンク変数に対するペナルティーコストを加算するという定式化に変更することは容易である。(10)式はネットワーク上の交通流の保存条件であり、(11)式は交通流の非負条件である。

(3) 最悪の被災パターンの下での死亡リスク最小化 被災パターンの持つ不確実性に対応するもう一つの考

え方として、どのような被災パターンが発生するのがわからない以上は安全側を考え、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という問題(ミニマックス問題)を考えることができる。この問題は、先の問題の目的関数(2)式を以下のように置き換えることによって定式化できる。(3)式から(11)式までの制約条件は同一である。

$$\min_{W, x, Y, Z} W \quad (12)$$

$$\text{s. t. } W \geq \sum_{i \in I} g(\sum_{k \in K} d_k^h x_{ik}^h) \quad \forall h \in H \quad (13)$$

目的関数の W は、最悪の被災パターンのもとでの死亡リスクを表しており、その条件を(13)式により保障している。(13)式右辺の死亡リスク関数を(1)式を用いて折れ線で近似すれば、この問題もやはり少数の0-1変数を持つ混合整数計画問題となる。

4. 宮城県における計算例

本研究では、宮城県を例にとり、実際に都道府県の防災担当者が直面するような計画問題の規模で計算が可能であるかの検証を行う。計算には、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を用いた。

(1) 使用データ

a) 計算対象ネットワーク

平成合併前のH16年における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(I)、県指定の12の災害拠点病院(J)、18個のICで構成される合計96個のノード(A)を設定し、県が定めた緊急輸送道路を参考にして設定した312個の有向リンク(K)を加えて宮城県の道路ネットワークをモデル化した(図1)。ただし、道路ネットワークを考える上で、居住地ゾーンの代表点である役所と災害拠点病院の場所が近い場合には、同一のノードとして扱うこととした。さらに、この道路ネットワークに医療行為の終了を示す1個の仮想ノードと、12個の医療施設使用リンク、96個の時間超過リンクを加えた。このようにして作成した、ノード数97、リンク数420のネットワークを用いて計算する。

b) 震災パターンと発生確率

宮城県では、宮城県沖地震の単独型と連動型、利府長町断層地震の3つのタイプの地震が甚大な被害をもたらすと想定されている。宮城県沖地震の単独型と連動型では被害が発生する地域がほぼ等しいので、より被害が大きい連動型で代表させることとする。ここでは、宮城県沖地震の連動型と長町利府断層地震の地震(H)の発生確率が同程度であると仮定して、仮想的に $\phi^h = 0.5$

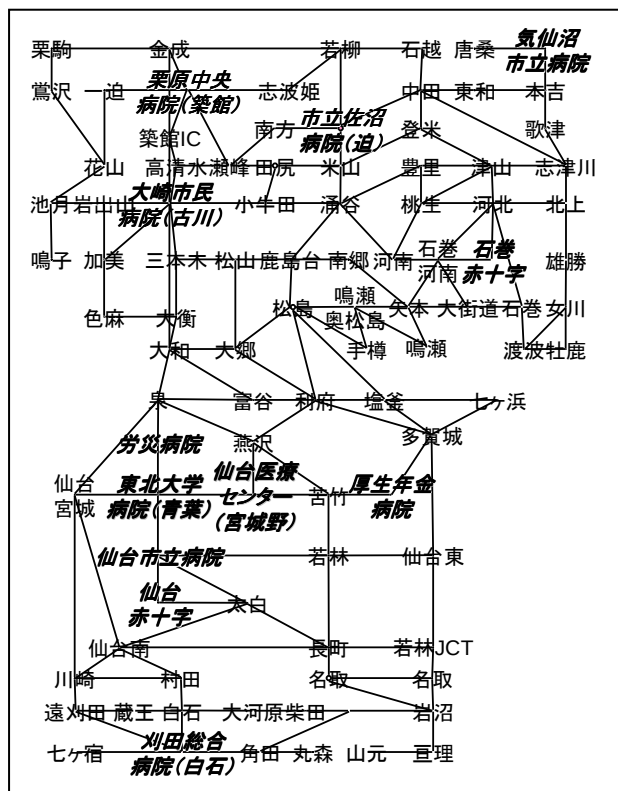


図1 モデル化した宮城県の道路ネットワーク

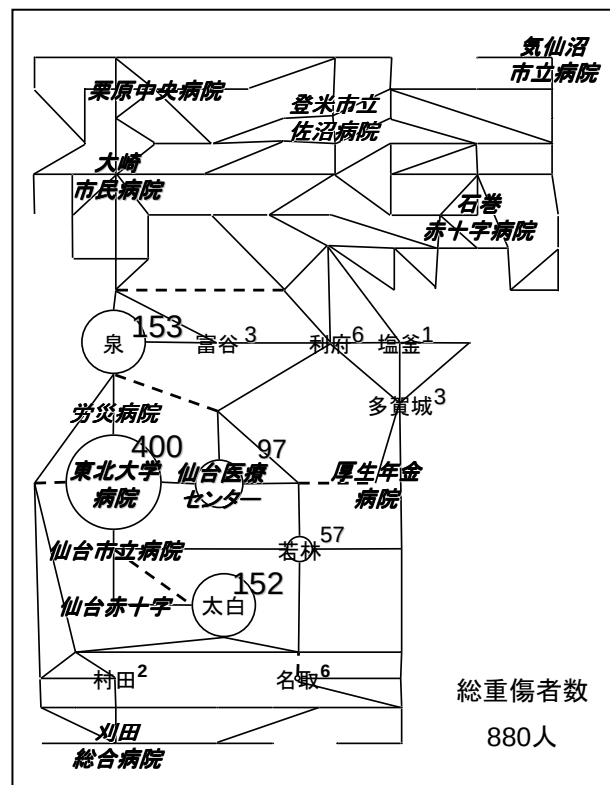


図3 長町利府断層地震による被害設定

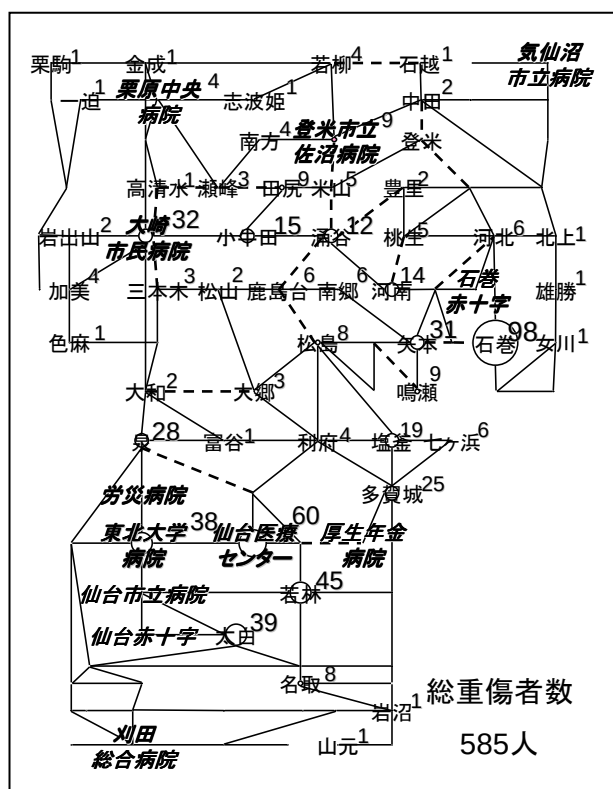


図2 宮城県沖地震による被害設定

で発生すると仮定する。

c) 重傷者数

「宮城県第3次地震被害想定調査」¹¹⁾に掲載されている平成合併前の市町村別の夏の昼間の想定重傷者数を

用いた。宮城県沖地震では図2の中の地名に付した数字に示すように、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3の中の地名に付した数字が示すようにその発生場所は仙台市の各区に集中している。図2、3の中には、発生する重傷者数にあわせた大きさの円を表示している。

d) 受け入れ可能重傷者数

この分析では県が指定する12の災害拠点病院への搬送を考える。災害時の受け入れ可能重傷者数は、病床数に空床率を乗じた通常時の受け入れ可能重傷者数に、建物災害非被害率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によって算出した。建物非被害率は「宮城県第3次地震被害想定調査」¹¹⁾の建物被害率の値を1から差し引いて与えた。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。以上の設定を表1にまとめる。

e) 所要時間

各道路リンクの距離を、地図検索マップHP“マピオン”¹²⁾が提供している“キョリ測”を用いて計測した。震災後の通行可能速度は、道路種別（高速道路、国道、県道）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。

表 1：受け入れ可能重傷者数と医療施設耐震化費用

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(千 m ²)	耐震化費用(億円)
公立刈田総合病院	55	17	17	15.4	8
仙台医療センター	160	84	100	60.1	15
仙台市立病院	120	48	74	40.3	20
東北大学付属病院	300	120	201	130.2	65
仙台赤十字病院	98	40	59	29.4	30
仙台労災病院	129	66	93	44.5	18
東北厚生年金病院	111	59	56	35.8	22
大崎市立病院	81	41	24	33.5	13
栗原市立栗原中央病院	87	44	26	13.3	17
登米市立佐沼病院	130	67	39	14.5	7
石巻赤十字病院	56	37	17	25.0	7
公立気仙沼市立病院	54	16	16	31.8	16

表 2 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

以上のように、ここでは道路構造物や舗装の損傷による速度低下は考えているものの、交通混雑による影響は考慮していない。

f) 途絶する道路区間

宮城県が管理している道路区間については、第3次地震被害想定調査に掲載されている被害想定を元に13個のリンクを設定し、それ以外の道路区間については、計測震度が6以上で川幅30m以上の河川を跨ぐ橋が存在する10個の道路区間が途絶するとした。これらの区間は先に示した図2、図3において破線で表現している。

g) 道路の耐震化

道路の耐震化は、f)で設定した途絶区間のすべてにおいて実施可能で、耐震化の実施により往復の両方向とも通常時の所要時間で通行できるようになると仮定する。ここでは耐震化費用をすべての道路区間において1億円と仮定する。もちろん、今後の調査により被災の形態にあわせた耐震化の具体的な工法に見合った工費を算定して、より実際的な値を与えることが望ましい。

h) 医療施設の耐震化

救急医療施設の耐震化は、地震時にも通常時と同じ容量の重傷者を受け入れできるようになると仮定し、耐震化費用は、病院の延べ床面積に比例すると考えて、表1のように与えた。

i) カーラーの救命曲線

総務省の救命救急の資料¹³⁾では、大量出血の場合、約70分で死に至ることがわかる。これより、1)式による死亡リスクの計算に当たり $t_1 = 0$ (分)、 $t_2 = 70$ (分)、 $g = 1/70 = 0.0143$ と設定した。

(2) 現在の施設における最適な搬送パターン

本モデルは重傷者の最適輸送計画を内包している。そこで、耐震化のための総予算を $B = 0$ とにおいて死亡リスク期待値を最小化する計算をすれば、現在の施設が受ける被災パターンのもとで、死亡リスクを最小とするような重傷者搬送パターンを求めることができる。1ケースの計算時間はAMD Athronx2(1.9MHz)のノートパソコンで3~5分程度であり、実用的な範囲に収まっている。2つの地震に対する計算結果を図4、図5に示す。

図4に示す宮城県沖地震では、空間的に広がる重傷者を小地域に分割して各病院が受け持つ。しかし図中破線で囲ったように、重傷者が多く発生する石巻などの地域では医療施設が足りない上に、道路途絶の影響で、容量に余裕がある登米市立佐沼病院や仙台市内の病院に70分以内に搬送することができない。結果として70分の到達範囲に受け入れ機関がなく、搬送を完全にあきらめざるを得ないという地域が発生している。

図5に示す長町利府断層地震では、仙台市内の病院からあふれた重傷者を他の地域の施設に搬送している。その際、南北に走る東北道と、石巻に向かう三陸道という高速道路が有効に使われているのに対し、高速道路が連結していない登米市立佐沼病院のみが容量いっぱいまで使用されていない。

なお、本モデルでの搬送パターンの計算は、混乱や交通混雑がない理想的な状況を想定して道路リンクと医療機関の重要度を計算し、長期的な耐震化計画のための必要情報を取り出すためのものである。実際に震災が起

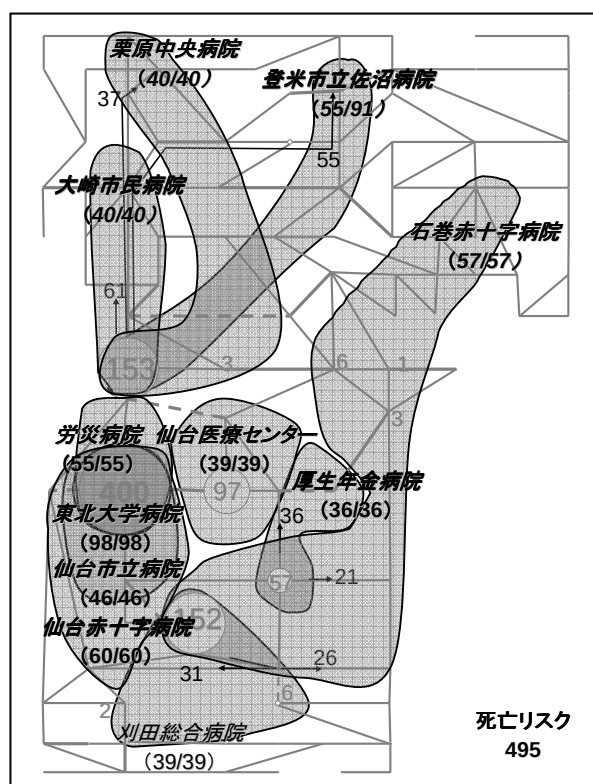
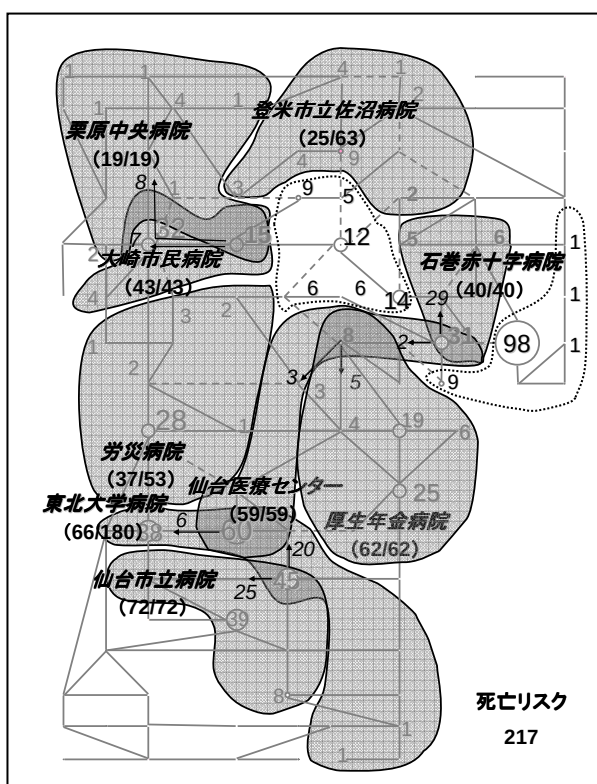


図4 宮城県沖地震発生時の最適搬送

図5 長町利府断層地震発生時の最適搬送

表3 死亡リスク期待値の最小化のもとでの予算制約の変化による耐震化戦略の変化

		予算制約	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		30	31	32	33	34	35	36	37	38
		目的関数値	356	351	346	341	340	338	337	336	335	334	333	332	332	332	331		288	286	280	278	268	265	259	255	253
道路の耐震化の有無	太白	仙台市立病院	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0
	苦竹	厚生病院	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	1	1	1	1	1	1	1
	松島	鹿島台	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0
	鹿島台	蒲谷	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	1	0	0	0	0	0
	蒲谷	米山	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	0	0	1	1	1
	米山	迫	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	0	0	1	1	1
	津山	登米	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		0	0	0	0	0	0	0	0	0
	登米	中田	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		0	0	0	0	0	0	0	0	0
	青葉	仙台宮城	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0
	厚生病院	苦竹	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0
	大郷	大和	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0
	鳴瀬	鳴瀬奥松島	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	0	0	0	0	0	0	1
	大街道	矢本	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0
	石巻	大街道	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	0	1	0	1	1
	田尻	津峰	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	0	0	0	0	0	0	0
病院の耐震化の有無		仙台赤十字(15)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	1	1	1	1	1	1	1	1
		厚生病院(17)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	0	0	0	1	1	1	1	1
		石巻赤十字(13)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	1	1	1	0	0	0	0	0

表4 最悪の被災パターンの死亡リスクの最小化のもとでの予算制約の変化による耐震化戦略の変化

		予算制約	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	30	31	32	33	34	35	36	37	38
		目的関数値	495	486	484	483	483	483	483	483	480	478	477	477	477	477	477	393	393	392	351	327	324	323	323	323
道路の耐震化の有無	名取 長町	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	太白 仙台市立病院	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	
	苦竹 厚生病院	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
	青葉 仙台宮城	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	
病院の耐震化の有無	白石(8)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
	仙台赤十字(15)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
	厚生病院(18)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	
	築館(7)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	

こった場合にはこのような理想的な輸送は困難であり、実際の医療施設と道路の被災状況、重傷者の発生状況、交通混雑の情報をリアルタイムに収集し、効率的な輸送計画を立案実行するための検討が別に必要であることは言うまでもない。

2つのモデルで、耐震化の総予算 B の値を1億円ずつ38億円まで増加させて最適解を求めた。その結果を表3、表4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。

まず、死亡リスクの期待値の最小化問題では、図4で示した容量に余裕のある登米市立佐沼病院に近い米山付近の途絶リンクを耐震化することが先決であり、病院

(3) 予算制約の変化による最適耐震戦略の変化

の耐震化が可能な予算が与えられても、必ずしも直ぐに病院の耐震化が行われるとは限らない。予算が15億円を超えると、長町利府断層地震の重傷者に対応するための仙台赤十字病院の耐震化が選択され、残りの予算で上記の道路区間の耐震化を行うという解になる。さらに33億円以上では、仙台で2つ目の厚生年金病院の耐震化が可能となるが、同時に道路の耐震化の順序にも違いが現れる。すなわち、新たに耐震化を行うことになった厚生年金病院につながるリンクの耐震化が必ず行われるとともに、この病院を広域的に利用することに役立つ道路リンクの耐震化が優先されることになる。

以上の具体的な結果は設定値に依存する可能性がある。しかし以上の結果によって、医療施設の耐震化の如何によってどの道路区間の耐震化を優先すべきかが変化するため、本研究のように両者の耐震化を連携して考えなければならないことが確認されたと言える。

一方、最悪被災パターンの死亡リスク最小化問題では、予算規模が少ないうちは、現状における死亡リスクの高い長町利府断層地震の対策のみが考慮される。図5に示したように、現状では880名という重傷者に対して医療施設の容量が大きく不足していることから、施設に直結する区間の耐震化を除けば、道路の耐震化のみではほとんど死亡リスクを減少させることはできない。したがって計算結果を見ても、その予算規模で最大限の施設の耐震化を実行するという解が得られている。たとえば予算規模が8億~14億円の範囲では仙台市内の病院の耐震化には足りないが、遠隔にある栗原市立築館病院を耐震化し、被災しない高速道路を活用して搬送するという解が得られている。

5. おわりに

本論文では、最適耐震化計画問題の枠組みとモデルの定式化を述べ、宮城県を例にとり、実際の計画問題の規模のネットワークデータを対しても実用的な時間で計算が可能であり、予算制約に応じて異なる組み合わせの耐震化解が得られることを示した。特に医療施設の耐震化の如何によってどの道路区間の耐震化を優先すべきかが変化することがわかり、両者の耐震化を連携して考えることの必要性が確認できた。以上のことから、道路と医療施設の双方を考えた耐震化計画の必要性を確認すること、および提案した計画モデルの適用可能性を確認することという、本研究の目的は達成できたと考える。

なお、具体的に得られた耐震化政策案の妥当性と実現性を高めるためには、今後関係機関の協力を得ながら、より現実的なデータを収集して設定を変更し、適用を進めていくことが必要である。さらに、震災発生後の具体

的な重傷者の搬送計画に対しても、本研究の知見を取り込んだ新しいモデルを開発していくことが必要であろう。

最後に、本研究の実施に当たり、平成20年度高速道路関連社会貢献協議会から研究助成金の援助を受けている。記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 倉内文孝・宇野伸宏・嶋本寛・山崎浩気：交通ネットワークサービスの信頼性解析に関する研究動向，土木計画学研究・講演集CD-ROM, Vol. 35, No. 215, 2007.
- 2) 長江剛志，藤原友，朝倉康夫：GIS と需要変動型利用者均衡配分を用いた道路ネットワーク耐震化の便益評価，土木計画学研究・論文集，Vol. 24, No. 2, 233-242, 2007.
- 3) 長江剛志，藤原友，朝倉康夫：利用者均衡配分を内生化した都市圏道路ネットワークの耐震化問題，土木計画学研究・講演集，No. 37, CDR0M, 2008.
- 4) 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.
- 5) 奥村誠，塚井誠人，安村勇亮：大規模地震による重傷者の搬送計画モデル，交通工学研究発表会論文報告集，Vol. 26, pp. 903-912, 2006.
- 6) 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.
- 7) Church, R. L. and Scaparra, M. P.: Protecting Critical Assets: The r -interdiction Median Problem with Fortification, Geographical Analysis, 39, pp. 129-146, 2007.
- 8) Gilboa, I. and Schmeidler, D.: Maxmin expected utility with non-unique prior, Journal of Mathematical Economics, Vol. 18, pp. 141-153, 1989.
- 9) Bell, M. G. H.: Mixed route strategies for the risk-averse shipment of hazardous materials, Networks and Spatial Economics, Vol. 6, pp. 253-265, 2006.
- 10) 長江剛志・赤松隆：危険物輸送のためのカストロフ回避戦略，土木学会論文集 D, Vol. 63, No. 4, 509-523, 2007.
- 11) 宮城県，第3次地震被害想定調査，2005年
- 12) <http://www.mapion.co.jp/>，地図検索マップHP「マピオン」
- 13) 総務省近畿総合通信局，救急医療の現状

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*

奥村誠**・堀内智司***・佐々木和寛****

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と道路搬送の条件を同時に満足する必要がある。本論文では、最適耐震化計画問題の枠組みとモデルの定式化を述べ、宮城県を例にとり、実際の計画問題の規模のネットワークデータを対しても実用的な時間で計算が可能であり、予算制約に応じて異なる組み合わせの耐震化解が得られることを示した。特に医療施設の耐震化の如何によってどの道路区間の耐震化を優先すべきかが変化することがわかり、両者の耐震化を連携して考えることの必要性が確認できた。

Optimal Seismic-Proof Reinforcement Planning, Considering Transportation of Injured People*

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

This research discusses the importance of a harmonized seismic-proof reinforcement planning of both medical facilities and road network, and proposes a mathematical planning model to be used as main analytical tool in such harmonized planning. Two planning models are formulated: one is to minimize expected death risk during the transportation of injured people weighted by the probability of several types of earthquake; the other is to minimize the death risk for the injured people in the most destructive earthquake. Through a case study in Miyagi Prefecture, Japan, both of these two models are proved to be applicable to the realistic size of the problem within the realistic computation time. The answers of the model show that the effective combination of seismic reinforcement becomes different according to the budget constraint. Furthermore, priority of road reinforcement is dependent on which medical facilities are reinforced. It confirmed the importance of the harmonized planning over the medical facilities and road network.
