

大規模地震重傷者搬送のための事前計画モデルに関する研究

The Seismic-Proof Planning Models, considering The Transportation of Injured People

佐々木和寛*

Kazuhiro SASAKI

*地域計画学研究室 (指導教員: 奥村誠 教授)

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. Furthermore, this model is expanded by transforming a minmax problem to a Linear Programming Problem, for several more complex cases, such as, two and more earthquake types, limited use of expressways, and dispatch of doctor teams are considered in.

Key Words : *Theory of planning methods, Disaster Planning*

1. 本研究の目的と既存研究

日本列島は複雑な地殻構造の上に存在しているため、世界的にも地震の多い国であり、過去より頻繁に大きな被害を生じるような地震に見舞われてきた。従来、防災対策は事後対策に重点が置かれていたが、近年では地震発生前の段階で発生しうる被害を最大限削減するという考えを受け、事前対策への認識が高まりつつある。

しかしながら、自治体財政が緊迫化する中で、異なる分野の行政機関がそれぞれ事前防災対策を講じることは難しい。このため、地震被害の削減には関係機関が共同で事前対策を検討することが必要となる。特に、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搬送して治療を行うかが重要であり、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、交通需要の集中が所要時間に与える影響を無視できるため、flow independent な状況を想定すればよい。これ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、交通需要と所要時間との相互作用が現象を規定するという 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、限られた施設をいかに有効に活用するか、そのためにはどのような情報提供が必要かという事後的な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、

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問題を、線形計画モデルとして定式化した研究もある⁵⁾。しかしながら、道路施設の被災の影響を考えるためには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方法にはなっていなかった。

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る一部の施設の機能停止の影響把握⁶⁾や、そのような機能停止を未然に防止する防衛策を最適化する問題の提案⁷⁾が行われている。本研究はこれらの定式化を参考にして、道路の耐震化と医療施設の耐震化を統合的に比較して、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。さらに、複数の想定地震に対応するなどのいくつかのミニマックス問題への拡張を図る。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ため、解の一意性や収束性の問題が生じないという特徴を持っている。

2. 重傷者搬送を考慮した耐震化計画問題

2.1 重傷者搬送と道路ネットワーク

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とする。また、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。この地域では、1種類の地震の発生が想定されており、その発生によって各居住ゾーン $i \in I$ で P_i 人の重傷者が発生するとともに、道路リンク $k \in K$ 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。このときの道路交通容量を S_k ，リンク所要時間を d_k で与える。リンク所要時間 d_k は、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。橋梁の落下などが予想される場合には被災時の道路交通容量 S_k が 0 であると設定することで途絶を表現できる。このような震災発生直後の状況下で、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。しかし、搬送された救急医療施設 $j \in J$ も震災の被害を受けており、重傷者を Q_j 人しか受け入れることができないとする。

2.2 耐震化計画の設定

耐震化は道路リンクと救急医療施設の 2 種類の施設に対して実行できるとする。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時の交通容量を ΔS_k 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時の受け入れ可能重傷者数を ΔQ_j だけ増加させることができる。この救急医療施設の耐震化の実施の有無を、0-1 変数である Y_j で表現する。

本研究では、耐震化の効果を重傷者搬送中の死亡リスクで評価する。死亡リスクは発生する重傷者数とその重傷者の搬送中の死亡確率の積で表され、そ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。ここでは、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。

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

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、耐震化すべき道路と医療施設の組合せを求めるといった問題になる。

2.3 道路と医療施設の耐震化計画モデル

死亡リスクの算出に必要な重傷者の搬送時間 t を求めるため、交通流と救急医療施設の利用を 1 つのネットワーク上で総合的に取り扱う必要がある。そこで、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たネットワークを用いて搬送時間 t を算出する。

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 $d_j = 0$ 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 は居住地の孤立や近接する救急医療施設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（救命時間超過リンク）である。居住地のセントロイド $i \in I$ から仮想ノード f に向けて移動時間 $d_{if} = t_2$ 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。

ここで、居住地 i において発生した重傷者 P_i の搬送に対してリンク $k \in K$ を用いる人数を表現する変数 x_{ik} を導入することにより、死亡リスクを最小化する耐震化計画問題は以下のような数理計画問題として定式化できる。

$$\min_{x, Y, Z} F = \sum_{i \in I} g \left(\sum_{k \in \bar{K}} d_k x_{ik} \right) \quad (2)$$

$$s.t. \quad \sum_{i \in I} x_{ik} \leq S_k + \Delta S_k Z_k \quad \forall k \in K \quad (3)$$

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

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

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

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

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

$$\sum_{k \in M_j} x_{ik} \geq P_i \quad \forall i \in I \quad (9)$$

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

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

目的関数の式(2)は、地域内の総死亡リスクを表している。カーラーの救命曲線を式(1)のように折れ線近似することにより計算を単純化している。すなわち、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を利用して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するという別の順序で計算している。

式(3)は道路リンクの容量に関する制約、式(4)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。式(5)は複数の耐震化を行う際の予算制約式である。式(6)と式(7)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。

式(8)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。式(9)は居住ゾーンごとの重傷者がいずれかの救急医療施設に搬送されるという条件であるが、救命可能時間 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

人数が救命時間超過を表す仮想リンクの変数値 x_{ii} 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。式(10)はネットワーク上の交通流の保存条件であり、式(11)は交通流の非負条件である。

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. ミニマックス問題による表現

3.1 複数の想定地震の考慮

日本は複雑な地殻構造の上に存在しており、同じ地域であっても震源の異なる地震が発生しそれによる被害も一様ではない。このため、1つの地震のみを想定した対策だけでは不十分といえる。そこで、地震のタイプを示す記号 $h \in H$ を導入すると、2.で提案したモデルの目的関数は、以下のようなミニマックス目的関数として表せる。

$$\min_{x,Y,Z} \max_h \left(\sum_{i \in I} g \left(\sum_{k \in K} d_k^h x_{ik}^h \right) \right) \quad (12)$$

ここで Church ら⁷⁾が提案したテクニックを用いると、式(12)のミニマックス目的関数は式(13)、(14)のように置き換えが可能である。

$$\min_{W,x,Y,Z} F \quad (13)$$

$$s.t. F \geq \sum_{i \in I} g \left(\sum_{k \in K} d_k^h x_{ik}^h \right) \quad \forall h \in H \quad (14)$$

この定式化において式(14)の右辺は地震タイプ $h \in H$ のもとでの死亡リスクを表しており、 F がその最大値を下回らないことを保障している。式(13)でこの F を最小化する問題に置き換えている。

これらの式に、地震タイプ h に対する式(3)、(4)、(8)~(11)の制約式を加えると、このミニマックス問題は少数の0-1変数を持つ混合整数計画問題となり、2.と同様、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。以下の3.2、3.3に示すミニマックス問題に関しても同じ手法を用いて、線形計画問題として表現できる。

3.2 高速道路点検による通行止めの考慮

高速道路は、重傷者の迅速な搬送を行う上で重要な施設となりうる。しかし、現状では地震発生後に安全点検が行われなければ開放することはできない。高速道路の点検は区間毎に行われ、完了次第その区間に入るインターチェンジのオンランプ $r \in R$ が開放されると仮定し、その開放までの時間を D_r とおく。居住地 i に発生する重傷者 P_i のうち、インターチェンジ r を経由し高速道路を使用して搬送される人数を V_{ir} とし、インターチェンジ r にアクセスする間に一般道リンク $k \in K_0$ を使用する人

数を v_{irk} とする。この時、居住地 i からインターチェンジ r まで到達した後、高速道路を利用するまでに要する時間は、以下のようなミニマックス問題として表現できる。

$$\max \left\{ \min_v \left(\sum_{k \in K_0} d_k v_{irk} \right), D_r V_{ir} \right\} \quad (15)$$

3.3 医療部隊派遣の考慮

災害救助現場や現場救護所において、応急処置は医師の指示が必要となるため、現地へ消防の配下にある救助部隊だけでなく医療部隊の派遣が必要となる。そこで、居住地 i の重傷者が、救急医療施設 $j_d \in J_d$ から居住地 $i_d \in I_d$ に派遣された医療部隊の治療を受ける状況を考える。居住地 i の重傷者 P_i のうち、居住地 i_d まで搬送される人数を $W_i^{j_d i_d}$ とし、その際、道路リンク k を使って搬送される人数を $w_{ik}^{j_d i_d}$ とおく。居住地 i の重傷者を治療するために救急医療施設 j_d から居住地 i_d に派遣される際、道路リンク k を使って派遣される医療部隊の数を $y_{ik}^{j_d i_d}$ とおく。ただし、 $y_{ik}^{j_d i_d}$ の単位は治療を受ける重傷者の数で定義する。このとき、救急医療施設 j_d から居住地 i_d に派遣された医療部隊に居住地 i の重傷者が治療されるまでの総所要時間は、以下のようなミニマックス問題として表現できる。

$$\max \left\{ \min_w \left(\sum_{k \in K} d_k w_{ik}^{j_d i_d} \right), \min_y \left(\sum_{k \in K} d_k y_{ik}^{j_d i_d} \right) \right\} \quad (16)$$

4. 小規模ネットワークでの計算例

ここでは、3.1の複数の地震を想定したミニマックス問題の計算例を示す。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 ver.4.8 を用いた。

4.1 計算設定

a) 対象地域と道路ネットワーク

図1の丸で示す8つの居住地ゾーン (I) からの重傷者を、灰色を付けた3つの居住地にある救急医療施設 (J) に搬送する。医療施設の下の大文字の数字は受け入れ能力を表わしている。8つの居住地は9区間の道路で結ばれている。計算にはこれに、1つの仮想ノードと3本の医療施設利用の仮想リンク、8本の時間超過仮想リンクを追加した、16個のノード (A) と55本のリンク (\bar{K}) から成るネットワークを用いる。

b) 想定地震被害

2つのタイプの地震 (H) を想定する。海洋型の地震では図2の中の居住地セントロイドの中の下線付き数字に示すように、重傷者がI市を中心に全域で発生し、全ての救急医療施設の能力低下、道路の3区間の途絶と5区間の所要時間増加を想定する。他方、直下型の地震では図3のように、大量の重傷者がS市を中心に発生し、同時にI市、S市の医療機関の能力低下とS市の周辺道路の3区間の

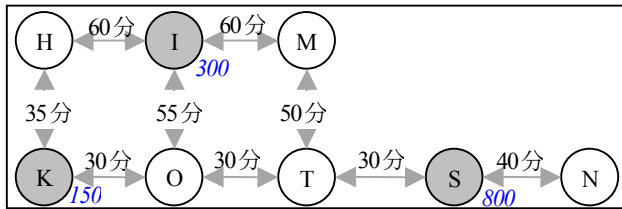


図1 計算例のネットワークと通常時所要時間

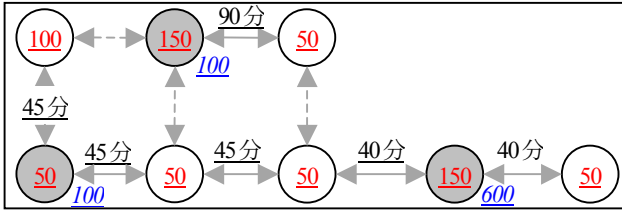


図2 海洋型地震による重傷者数と道路、医療施設の能力の変化

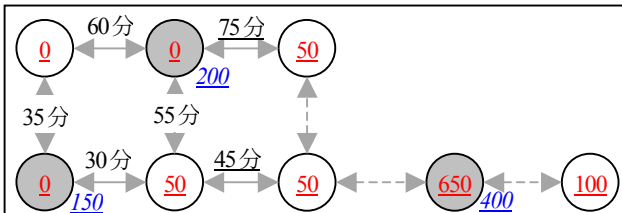


図3 直下型地震による重傷者数と道路、救急医療施設の能力の変化

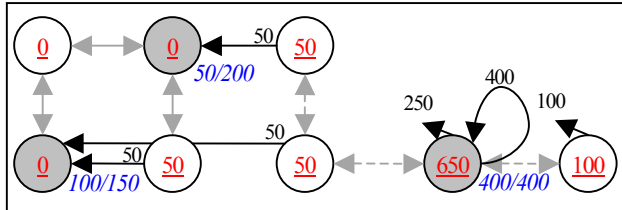


図4 B=0での直下型地震における最適搬送パターン

表1 最適耐震化戦略と死亡リスク

耐震化 予算B (億円)	最悪な 被害を もたら す地震	死亡 リスク (人)	減 分	道路区間の耐震化 Z[k]					救急医療施設 の耐震化 Y[j]			
				HI (5)	IO (5)	MT (5)	ST (10)	NS (10)	K (10)	S (40)	I (20)	
0	直下型	422		0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	直下型	414	8	0	0	0	1	0	0	0	0	0
20	直下型	411	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
30	直下型	414	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
40	海洋型	234	212	0	0	0	0	0	0	0	1	0
50	海洋型	202	30	0	0	0	0	0	0	1	1	0
60	直下型	172	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1
70	海洋型	170	38	0	0	0	1	0	0	1	1	1
80	海洋型	132	38	1	1	0	0	1	0	1	1	1
90	海洋型	126	6	0	1	0	0	1	1	1	1	1
100	海洋型	126	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
110	海洋型	126	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

途絶、2区間の所要時間の増加を想定する。図2, 3において救急医療施設の受け入れ容量や道路区間の所要時間が変化した後の数値には下線を付して示している。

c) 耐震化オプションの設定

道路の耐震化は、途絶が生じる可能性がある5つの区間(H-I, I-O, M-T, S-T, N-S)において実施可能で、それにより通常時の所要時間で通行できるようになると仮定する。費用はH-I間5億円, I-O間5億円, M-T間5億円, S-T間

10億円, S-T間10億円とする。医療施設の耐震化はK市10億円, I市20億円, S市40億円で実施でき、その結果、地震時にも通常時と同じ容量の重傷者を受け入れられるようになるかと仮定する。

4.2 計算結果と考察

耐震化予算 B を0億円から110億円まで10億ずつ変化させてモデルを計算する。その結果得られる最適耐震化戦略と実現する死亡リスクを表1に示す。

耐震化予算 B = 0 億円の際は直下型地震の死亡リスクは海洋型の値よりも大きい。その最適搬送パターンを図4に示すが、N市, S市の重傷者の多くは搬送されていない。

表1より、耐震化予算 B が30億円以下のケースでは直下型地震の死亡リスクが海洋型を上回るが、耐震化によるリスクの減少幅は小さい。特に、予算が30億円まで増加しても、10億円の時から死亡リスクを減少させることができない。耐震化予算 B が40億円以上の時の最適耐震化戦略に着目すると、I市, S市の医療施設や道路区間IO, NSの道路は一度耐震化されるとそれ以上の予算のケースでは必ず耐震化され続ける。一方で、K市の救急医療施設や道路区間HI, STの道路は他のオプションとの兼ね合いで耐震化されるかどうかは変化する。

全体的に見ると、被害が集中する地域の救急医療施設の耐震化を図り、余った分で道路の耐震化を行うことが望ましいが、医療施設と道路を組み合わせる耐震化する解も多く、両者を同時に考える重要性が確認できた。

5. おわりに

本論文では、地震発生時の重傷者搬送に着目して道路と医療施設の耐震化を統一的に計画する数理計画問題モデルを提案した。さらに、ミニマックス問題への拡張方法を用いていくつかの問題への拡張を図った。

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, CDROM, 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.

(2010年2月8日提出)