

## 97. 重傷者輸送と医療チームの派遣を考慮した最適道路・医療施設耐震化計画モデル

Optimal seismic-proof planning model considering transportation of injured people and dispatch of medical teams

奥村 誠\*  
Makoto Okumura\*

In case of large earthquake, large number of severely injured people dispersed in large areas will wait for medical service. We should prepare enough number of medical facilities as well as road network for the transportation of injured people, under the limited budget for seismic-proof projects. Recently, Disaster Medical Assistance Teams (DMAT) are settled up in order to quick on-site service in remote locations. Road network will be used for dispatch of the medical teams, as well as for transportation of injured people. This article propose an optimal seismic-proof planning model considering the dispatch of medical teams, by including a min-max structure based on the fact that on site medical service can be started at the timing no earlier than arrival of medical team and arrival of injured people. Small application of the model illustrates that medical team dispatch affects on optimal seismic-proof strategy.

**Keywords:** seismic-proofing, emergent medical service, mixed integer programming, min-max problem

耐震化, 緊急医療, 混合整数計画, ミニマックス問題

### 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重傷者をいかに早く病院へ搬送するかが重要であり<sup>1)</sup>、その搬送計画のためのモデルの提案がなされてきた<sup>2)</sup>。また、こうした地震発生後の輸送を円滑に行うために、事前に市町村を跨ぐような広域の道路ネットワークや医療施設を耐震化する場面を想定した数理計画モデルの提案も行われている<sup>3, 4)</sup>。近年では、複数の地震を想定したミニマックス型の計画モデルの提案がなされ、一県レベルの実用的規模の問題を求解できることが示されている<sup>5)</sup>。

これらのモデルでは、被災地から災害指定病院に迅速に傷病者を搬送するための道路の役割を問題としている。しかし、災害指定病院から離れた地域が大きな被害を被った場合には、現地に医療チームを派遣する方が効率的な場合があり、DMAT(Disaster Medical Assistance Teams)と呼ばれる災害派遣医療体制の整備が進められている。この医療チームの派遣では、ドクターヘリなどの空輸も利用されるものの、量的には多くを道路交通に頼らざるを得ない。そのため、上述した広域道路ネットワークの耐震化計画モデルにおいて、重症者の搬送に加えて医療チームの派遣にも道路が使用される状況を考慮しておくことが望ましい。

本論文では、医療チーム配置と医療施設及び道路の耐震化を事前に計画するモデルを提案する。そのため、実際の地震発生後に被災状況の情報を得て、効率的な医療チームの派遣と重傷者の輸送を事後的に計画するものとは異なる。派遣医療チームの活動は、チームの到着時刻と重傷者の到着時刻の遅いほうに制約されるというミニマックス構造を含むが、Church ら<sup>6)</sup>による変換テクニックにより、混合整数線形計画問題として定式化できる。

本論文では、小規模な仮想ネットワーク上での計算例を

示すが、少数の 0-1 変数のみを含む混合整数線形計画問題であるため、0-1 変数に伴う組合せ数と地域数の 2 乗の積のオーダーで求解が可能であり、実用的規模の問題への適用が可能な定式化となっている。

### 2. 想定する計画問題

#### 2.1 道路ネットワークと被害の想定

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、道路リンク  $k \in K$  の一部が被災し途絶と所要時間の増加が生じると仮定する。本研究では地域防災計画において、災害直後の救急、医療、消防、災害対策、交通規制などのための公的な車両と負傷者の医療施設への輸送のみが許される緊急輸送の段階を念頭に置いている。そのためリンク所要時間  $d_k$  は、沿道建物や道路構造物の破損の影響はあるが交通量の影響を考えない flow independent な設定を用いる。またリンクの途絶は、被災時の交通容量  $S_k$  を 0 と設定することで表現する。

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災害指定医療施設、または緊急医療チーム派遣を受けた居住ゾーンに運ぶ。このとき、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。

\*正会員 東北大学東北アジア研究センター (Tohoku University)

## 2.2 死亡リスクの評価方法

ここでは、重傷者搬送中の死亡リスクを用いて計画案を評価する。死亡リスクは各居住ゾーン  $i \in I$  で発生が想定される  $P_i$  人の重傷者数と、その重傷者の搬送中の死亡確率の積で表わす。死亡確率はカーラーの救命曲線と呼ばれる地震発生から医療が開始されるまでの所要時間  $t$  に対する S カーブ状の関数  $g(t)$  で与えるが、ここでは、数理的な取り扱いを容易にするために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。

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

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整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。

第 1 の仮想リンクは救急医療施設の利用を表す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  $d_{jf} = 0$  のリンクを設定する。第 2 の仮想リンクは、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。

## 2.3 医療チームの派遣

対象地域全体で、1 チームあたり  $\alpha$  人の重傷者を治療できる能力を持った災害医療チームを  $N$  チーム保持することが可能であると仮定する。この医療チームは平常時の医療サービスの向上にも役立つため、チームの総数  $N$  は他の様々な要因との関係で外的に与えられ、本問題ではその準備費用は考慮しないこととする。これらの医療チームを事前に救急医療施設  $j_d \in J_d$  のそれぞれに  $n_{j_d}$  チームずつ配置して、平常時は各施設の医療活動に当たらせる。地震発生直後、これらの医療チームは配置された施設  $j_d \in J_d$  から居住地  $i_d \in I_d$  に派遣され、居住地  $i_d \in I_d$  の住民だけでなく、近隣から搬送されてきた重傷者も治療することができる。その際の治療開始までの所要時間は、次の 2 つの値のうち、大きいほうの値となる。

- A) 居住地  $i \in I$  で発生する重傷者が居住地  $i_d \in I_d$  に到着するまでの所要時間
  - B) 医療チームが救急医療施設  $j_d \in J_d$  から居住地  $i_d \in I_d$  に到着するまでの所要時間
- 死亡リスクを最小化するという問題設定では、医療チー

ムの能力を無駄なく使い切るように同数の重傷者数が搬送される。そこで、ケース A), B) の各所要時間の代わりに、治療を受ける重傷者数を掛けた総所要時間を求めて比較を行う。そのため、第 3 の種類の仮想リンクを加えたネットワークを考える。すなわち、派遣医療チームによる医療行為を表わすために、派遣先の居住地  $i_d \in I_d$  から、医療行為終了の仮想ノードに向けて移動時間  $d_{i_d i_d} = 0$  の仮想リンクを加える。道路リンクの集合  $K$  にこの仮想リンク  $i_d \in I_d$  を加えたリンクの集合を  $\bar{K}_1$  とする。

## 2.4 医療チーム配置と耐震化の計画

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  $\Delta S_k$  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  $\Delta Q_j$  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。耐震化総予算額の上限値を  $B$  とする。

このほかに事前に決定すべき変数として、各救急医療施設ごとに平常時に配置される医療チームの数  $n_{j_d}$  がある。

ここで解くべき問題は、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、同時に医療チームの地理的な配置  $n_{j_d}$  を決めるという問題になる。

## 3. 計画問題の定式化

### 3.1 搬送に関する変数の定義

居住地  $i \in I$  に発生する重傷者数  $P_i$  は、救命時間内にいずれかの救急医療施設へ搬送されて治療を受ける重傷者数  $p_i$ 、居住地  $i_d \in I_d$  に派遣されている緊急医療チームの治療を受ける重傷者数  $W_i^{j_d i_d}$ 、および救命時間内での搬送が断念される重傷者数  $x_{if}$  の 3 つに分けることができる。

救急医療施設に搬送される  $p_i$  のうち、搬送中に道路リンク  $k \in K$  を使用する人数を  $x_{ik}$  とおく。一方  $j_d$  から  $i_d$  に派遣してきた医療チームの治療を受ける  $W_i^{j_d i_d}$  人の重傷者のうち、道路リンク  $k \in K$  を使って搬送される人数を  $w_{ik}^{j_d i_d}$  とおく。さらに居住地  $i \in I$  の重傷者を治療するために救急医療施設  $j_d \in J_d$  から居住地  $i_d \in I_d$  に派遣される医療チームのうち、道路リンク  $k \in K$  を使うものを  $y_{ik}^{j_d i_d}$  とおく。ただし、 $y_{ik}^{j_d i_d}$  の単位は、医療チーム数ではなく、治療を受ける重傷者の数（ $\alpha$  倍）で定義する。

### 3.2 ミニマックス問題の定式化

以上から医療チーム配置と耐震化の計画モデルは、以下のように目的関数の中にミニマックス構造を含む数理計画

問題として表現できる。

$$\begin{aligned} \min_{x, w, y, Y, Z} & \sum_{i \in I} g \left[ \sum_{k \in K} d_k x_{ik} + \right. \\ & \left. + \sum_{i_d \in I_d} \sum_{j_d \in J_d} \max \left( \sum_{k \in K_1} d_k w_{ik}^{j_d i_d}, \sum_{k \in K_1} d_k y_{ik}^{j_d i_d} \right) \right] \quad (2) \end{aligned}$$

s.t.

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} x_{ik} + \sum_{i \in I} \sum_{j_d \in J_d} \sum_{i_d \in I_d} w_{ik}^{j_d i_d} & \quad \forall k \in K \quad (3) \\ + \sum_{i \in I} \sum_{j_d \in J_d} \sum_{i_d \in I_d} \frac{y_{ik}^{j_d i_d}}{\alpha} & \leq S_k + \Delta S_k Z_k \end{aligned}$$

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

$$\sum_{i_d \in I_d} \sum_{i \in I} W_i^{j_d i_d} \leq \alpha \cdot n_{j_d} \quad \forall j_d \in J_d \quad (5)$$

$$\sum_{j_d \in J_d} n_{j_d} \leq N \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} c_k Z_k + \sum_{j \in J} e_j Y_j \leq B \quad (7)$$

$$Z_k = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$Y_j = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall j \in J \quad (9)$$

$$P_i = p_i + \sum_{j_d \in J_d} \sum_{i_d \in I_d} W_i^{j_d i_d} + x_{if} \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{k \in L_i} x_{ik} \geq p_i \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$\sum_{k \in M_f} x_{ik} \geq p_i \quad \forall i \in I \quad (12)$$

$$\sum_{k \in L_a} x_{ik} = \sum_{k \in M_a} x_{ik} \quad \forall a \in A - \{i\}, \forall i \in I \quad (13)$$

$$0 \leq x_{ik} \quad \forall i \in I, \forall k \in \bar{K} \quad (14)$$

$$\sum_{k \in L_i} w_{ik}^{j_d i_d} \geq W_i^{j_d i_d} \quad \forall i \in I, \forall j_d \in J_d, \forall i_d \in I_d \quad (15)$$

$$w_{i_d}^{j_d i_d} \geq W_i^{j_d i_d} \quad \forall i_d \in I_d, \forall j_d \in J_d, \forall i \in I \quad (16)$$

$$\sum_{k \in L_a} w_{ik}^{j_d i_d} = \sum_{k \in M_a} w_{ik}^{j_d i_d} \quad \forall a \in A - \{i\}, \forall i_d \in I_d, \forall j_d \in J_d, \forall i \in I \quad (17)$$

$$0 \leq w_{ik}^{j_d i_d} \quad \forall i_d \in I_d, \forall j_d \in J_d, \forall i \in I, \forall k \in \bar{K} \quad (18)$$

$$\sum_{k \in L_d} y_{ik}^{j_d i_d} \geq W_i^{j_d i_d} \quad \forall i \in I, \forall j_d \in J_d, \forall i_d \in I_d \quad (19)$$

$$y_{i_d}^{j_d i_d} \geq W_i^{j_d i_d} \quad \forall i \in I, \forall j_d \in J_d, \forall i_d \in I_d \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k \in L_a} y_{ik}^{j_d i_d} &= \sum_{k \in M_a} y_{ik}^{j_d i_d} \\ \forall a \in A - \{i\}, \forall i_d &\in I_d, \forall j_d \in J_d, \forall i \in I \quad (21) \end{aligned}$$

$$0 \leq y_{ik}^{j_d i_d} \quad \forall i_d \in I_d, \forall j_d \in J_d, \forall i \in I, \forall k \in \bar{K} \quad (22)$$

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簡略化している。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順序で計算している。

式(3)は道路の容量制約、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。以下の計算ではいずれも被災前の水準に緩和できると仮定する。式(5)は  $j_d \in J_d$  に事前に配置される医療チームの治療能力、式(6)は総医療チーム数の制約である。式(7)は複数の耐震化を行う際の予算制約式である。式(8)と式(9)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(10)では各居住地に発生する重傷者を搬送ケースに応じて割り振っている。式(11)、(12)により、救急医療施設へ搬送されるよう割り振られた重傷者のすべてが居住地から救急医療施設へ搬送されることを保証している。式(13)と(14)は重傷者搬送交通の保存条件と非負条件である。

また、式(15)から(18)では、医療チームの治療を受けるよう割り振られた各居住地の重傷者が派遣先で治療を受けられることを保証しており、式(19)、(20)では、割り振られた各居住地の重傷者に対して医療チームが派遣されることを保証している。式(21)と(22)は医療チーム派遣交通の保存条件と非負条件である。

### 3.3 定数係数の混合整数計画問題への変換

ここで前節の問題に、Church ら<sup>6)</sup>のミニマックス問題を線形計画問題として表現するテクニックを用い、媒介変数  $U_i^{j_d i_d}$  を使用して、目的関数の式(2)を以下の式(23)～(25)に置き換える。

$$\begin{aligned} \min_{x, w, y, Y, Z} & \left( g \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} d_k x_{ik} + g \sum_{i \in I} \sum_{j_d \in J_d} \sum_{i_d \in I_d} U_i^{j_d i_d} \right) \quad (23) \\ \text{s.t.} & \end{aligned}$$

$$U_i^{j_d i_d} \geq \sum_{k \in K_1} d_k w_{ik}^{j_d i_d} \quad \forall i \in I, \forall j_d \in J_d, \forall i_d \in I_d \quad (24)$$

$$U_i^{j_d i_d} \geq \sum_{k \in K_1} d_k y_{ik}^{j_d i_d} \quad \forall i \in I, \forall j_d \in J_d, \forall i_d \in I_d \quad (25)$$

式(24)の右辺は、居住地  $i \in I$  で発生する重傷者が居住地

$i_d \in I_d$  に到着するまでの総所要時間を表わし、式(25)の右辺は、医療チームが救急医療施設  $j_d \in J_d$  から居住地  $i_d \in I_d$  に到着するまでの総所要時間を表わしており、 $U_i^{j_d i_d}$  がこの両者を下回らないことを保証している。式(23)でこの  $U_i^{j_d i_d}$  を最小化することによって、ミニマックス構造を含む問題を線形計画問題として表現している。

以上の式(23)を目的関数とし、式(24)、(25)および式(3)～(22)の制約を持つ問題は混合整数計画問題となり、整数変数の個数が少ないとことから一般の線形計画法のパッケージで実用的な時間内で最適解を得ることが可能となる。

#### 4. 小規模な計算例

##### 4.1 計算ケースの設定

本章の目的は、医療チームの派遣の有無により道路の使われ方が変化して最適耐震化計画の解が変化する例を示すことにある。以下では宮城県の都市配置と宮城県沖地震の被害想定を参考に計算ケースの想定を行うが、あくまでも仮想的な例題であり、ここで示した計算結果が実用的な政策判断に使えるわけではないことに注意が必要である。

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。医療施設の下の斜体数字は受け入れ能力を表わし、8つの居住地は9区間の道路で結ばれている。

被害想定を図2に示す。居住地ゾーンの中の下線付き数字は重傷者数であり、I市を中心に全域で発生する。また全ての救急医療施設の能力の低下、3区間の道路の途絶と5区間の所要時間増加を想定しており、変化後の数字には下線を付けて表現している。

計画問題の政策オプションとして、途絶が想定される3つの道路区間 HI, IO, MT は各5億円で耐震化でき、通常の所要時間で通行できるようになると仮定する。救急医療施設の耐震化費用はI市20億円、K市10億円、S市40億円であり、通常時の容量が確保できるようになると仮定する。

なお式(1)において  $t_1 = 0$  (分)、 $t_2 = 125$  (分)、救命直線の勾配を  $g = 1/125 = 0.008$  (1/分)とおいて計算する。この値はカーラーの出血多量の曲線を基準に、搬送前の応急処置によるリスクの低下を想定して設定した。また1つの医療チームが治療できる重傷者数  $\alpha$  を10人と仮定した。

計算には、線形計画法のフリーウェアパッケージ glpk の ver4.8 を用いた<sup>7)</sup>。このパッケージは整数変数及び0-1変数を明示的に指定すると、整数緩和問題を上界として用いた分枝限定アルゴリズムによって効率的に計算する機能を有している。

##### 4.2 総医療チーム数の増加による効果

耐震化予算  $B$  を10億円刻みに設定し、総医療チーム数  $N$  を2ずつ増やして、最適耐震化戦略と最適医療チーム配置を計算した。耐震化予算  $B$  および総医療チーム数  $N$

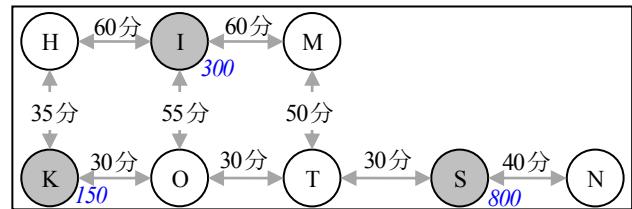


図1 計算例のネットワークと通常時所要時間

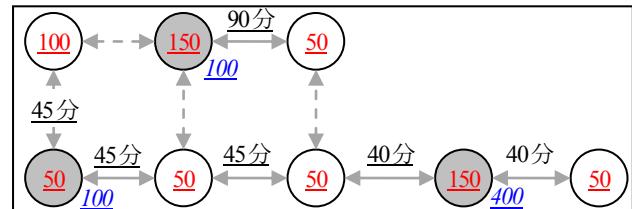


図2 重傷者数と道路、医療施設能力の被害想定

表1 総医療チーム数及び耐震化予算と死亡リスク値

	耐震化予算 B(億円)					
	0	10	20	30	40以上	
医療チーム数	0	234.0	202.0(3.2)	170.0(3.2)	132.0(3.4)	126.0(2.7)
2	221.2	195.6(2.6)	157.2(3.2)	127.6(3.1)	119.6(2.5)	
4	208.4	189.2(1.9)	144.4(3.2)	121.2(2.9)	113.2(2.4)	
6	198.8	182.4(1.6)	134.8(3.2)	116.8(2.7)	109.2(2.2)	
8	192.4	171.2(2.1)	128.4(3.2)	114.4(2.6)	107.6(2.1)	
N	10	186.0	160.0(2.6)	122.0(3.2)	110.0(2.5)	106.0(2.0)

死亡リスク値の単位は人、カッコ内は耐震化1億円当たりのリスク

表2 各計算ケースにおける

最適耐震化戦略と最適医療チーム配置

耐震化予算 B (億円)	総医療チーム数 N	死亡リスク (人)	道路耐震化 Zk			医療施設耐震化 Yj			医療チーム配置 njd		
			HI (5)	IO (5)	MT (5)	K (10)	I (20)	S (40)	K	I	S
10	0	2020	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	2	195.6	0	0	0	1	0	0	0	0	2
	4	189.2	0	0	0	1	0	0	4	0	0
	6	182.4	0	1	1	0	0	0	6	0	0
	8	171.2	0	1	1	0	0	0	8	0	0
	10	160.0	0	1	1	0	0	0	10	0	0
20	N		0	1	1	0	1	0	N	0	0
	0	132.0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
	2	127.6	1	0	1	0	1	0	0	0	2
	4	121.2	1	0	1	0	1	0	0	0	4
	6	116.8	1	0	1	0	1	0	1	0	5
	8	114.4	1	0	1	0	1	0	3	0	5
30	10	110.0	0	1	1	0	1	0	5	0	5
	0	126.0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
	2	119.6	0	1	1	1	1	0	0	0	2
	4	113.2	0	1	1	1	1	0	0	0	4
	6	109.2	0	1	1	1	1	0	0	0	6
	8	107.6	0	1	1	1	1	0	0	0	8
40	10	106.0	0	0	1	1	1	0	0	0	10
	N		0	1	1	1	1	0	0	0	N

と最適解における死亡リスクの関係を表1に示す。総医療チーム数の値に限らず、耐震化予算を40億円を超えると死亡リスクは改善しない。全体的には総医療チーム数が多い

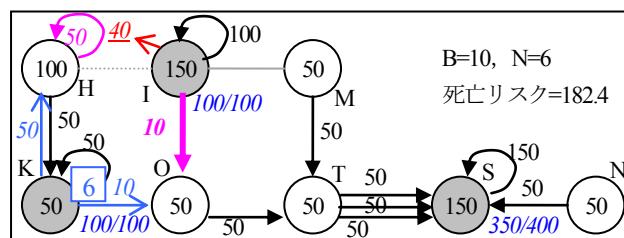
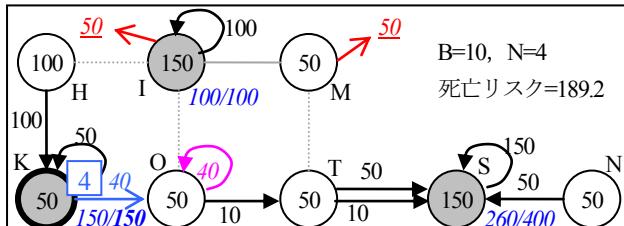


図3 医療チーム派遣の増加により不要となる  
病院耐震化予算を道路耐震化に回す例

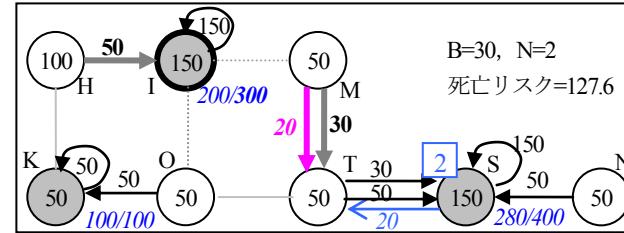
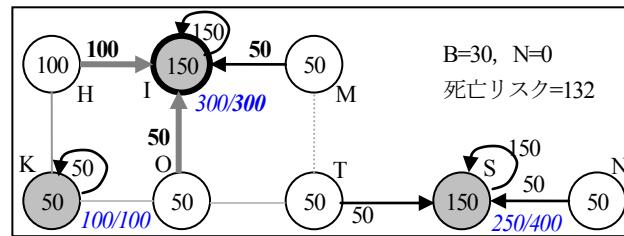


図4 医療チーム派遣の増加により  
耐震化される道路区間が変化する例

ほど、単位耐震化費用に対する死亡リスクの低減効果は小さくなるが、 $B = 10$  億円と小さい時は医療チーム数の増加が低減効果の拡大をもたらす場合がある。

#### 4.3 医療チーム数の増加による耐震化戦略の変化

次に、総医療チーム数  $N$  の増加が最適耐震化戦略にもたらす影響を分析する。耐震化予算  $B$  が 20 億円または 40 億円以降では総医療チーム数  $N$  の増加により最適耐震化戦略が変化しなかった。耐震化予算  $B$  ごとの死亡リスクの値と最適耐震化戦略および最適医療チーム配置を表2に示した。耐震化予算  $B$  が 20 億円の時は I 市の施設を耐震化して I 市と M 市の死亡リスクを軽減することが効果的である。耐震化予算  $B$  が 40 億円以降では容量が不足する K 市と I 市の医療施設の耐震化とそれにつながる道路区間の耐震化がすべて実行可能であるため、総医療チーム数  $N$  の増加は最適耐震化戦略に影響を持たない。

医療チームが 2 チーム増加する以前と比較して最適耐震化戦略が変化したケースは 4 ケースあり、それらは灰色で表示している。さらに、その 4 ケースの最適搬送パターン

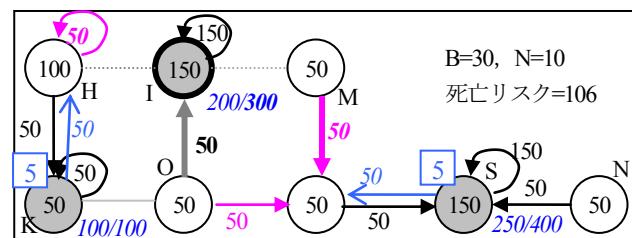
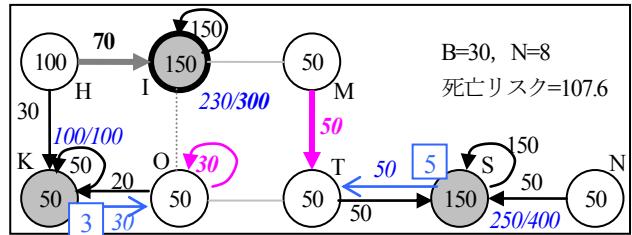


図5 医療チーム派遣の増加により  
耐震化される道路区間が変化する別の例

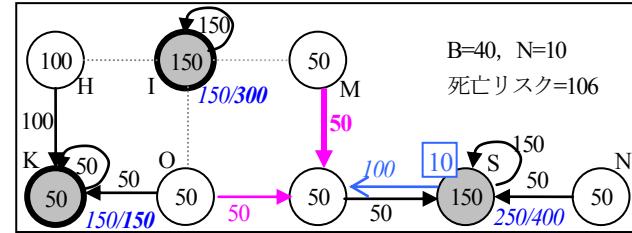
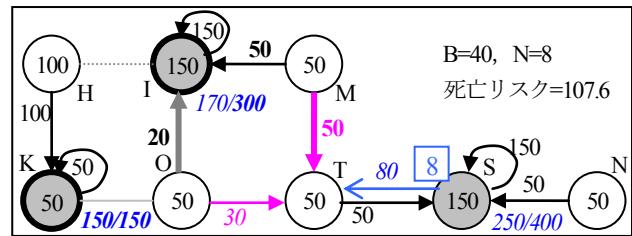


図6 医療チーム派遣の増加により  
道路区間の耐震化が不要になる例

を図3から図6に示す。これらの図において、医療チームが配置された救急医療施設がある居住地の横には、配置された医療チーム数を囲った斜体の数字で示す。医療施設の容量と利用量を表示し、耐震化がなされた施設は丸印の囲みを太く表示した。医療施設への重傷者搬送を黒の矢印で、医療チームの派遣を斜体数字を伴う青の矢印で、医療チームの治療を受ける重傷者の搬送ルートを斜体数字を伴うピンクの矢印で示した。さらにそれらが耐震化された区間を通過する場合には太い矢印とした。さらに、図3における下線数字を付した赤の矢印は、時間超過による死者数を示している。

まず、耐震化予算  $B$  が 10 億円とし総医療チーム数  $N$  を 4 チームから 6 チームに増やした時には、K 市の救急医療施設の代わりに道路区間 IO, MT が耐震化される。図3に示すように、H 市の重傷者 50 人を K 市の救急医療施設に搬送して治療する代わりに K 市から H 市へ派遣される 5 つの医療チームが治療を行う。これにより、K 市の救急医療施設の耐震化が不要となり、代わりに道路区間が耐震化され、I 市、M 市からの搬送が可能となる。このように、

総医療チーム数の増加によって、救急医療施設の耐震化予算を道路区間の耐震化予算へ転用することが可能なケースがある。

次に、耐震化予算  $B$  を 30 億円に固定し総医療チーム数  $N$  を 0 チームから 2 チームに増やした時の最適搬送を図 4 に示している。道路区間 IO の代わりに道路区間 MT が耐震化される。S 市から T 市に派遣された医療チームの治療を受けるために、道路区間 MT の耐震化によって M 市で発生する重傷者 50 人のうちの 30 人が搬送される。このように医療チームの派遣に伴って耐震化すべき道路区間が変化するケースがあるため、道路の耐震化と医療チーム配置と一緒に考える必要があることが確認できた。

次に、耐震化予算  $B$  を 30 億円に固定し総医療チーム数  $N$  を 8 チームから 10 チームに増やした時には、図 5 に示すように道路区間 HI の代わりに道路区間 IO が耐震化される。当初、O 市の重傷者は K 市へ搬送および K 市から派遣された医療チームによって治療を受けていたが、総医療チーム数が増加するとその全員が I 市の救急医療施設に搬送される。一方、I 市に搬送されていた H 市の重傷者は K 市への搬送と K 市から派遣された医療チームによって治療を受けることになり、結果的に死亡リスクを減少させることができる。

最後に、耐震化予算  $B$  を 40 億円に固定し、総医療チーム数  $N$  を 8 チームから 10 チームに増やした時の結果を図 6 に示す。8 チームが配置される場合、S 市から T 市に派遣される医療チーム数の制約により、O 市の重傷者全てを治療する事が不可能なため、一部を I 市の救急医療施設に搬送する必要があり道路区間 IO の耐震化が必要であった。総医療チーム数の増加により、この搬送が不要になる結果、道路区間 IO の耐震化が不要となる。このように、総医療チーム数の増加により耐震化費用が削減できるケースが存在する。

以上の結果から、総医療チーム数の増加によって救急医療施設の耐震化費用の転用や道路施設の耐震化費用の削減が可能になり、最適耐震化戦略が変化する場合があることが確認できた。

## 5. おわりに

本研究では、地震重傷者搬送を考慮した耐震化計画モデルにおいて、重傷者を災害医療施設に搬送するばかりでなく、医療施設から医療チームを被災地に派遣することも考慮できるように拡張して、混合整数計画問題として定式化できることを示した。この定式化は、ニーズと資源のマッチングによって始めて機能を発揮するような地域サービスの供給問題に適用できる可能性を有しており、施設配置問題に対する OR 手法の研究に対しても大きな貢献を有していると考える。

仮想的な小規模ネットワークでの計算例においては、地域内に配置できる総医療チーム数を増加させながら最適耐

震化戦略と最適医療チーム配置を計算した。その結果、総医療チーム数の増加によって救急医療施設の耐震化費用の転用や道路施設の耐震化費用の削減が可能になり、最適耐震化戦略が変化する場合があることを示した。この仮想的な計算例から、直接実際の計画に役立つ知見を導くことはできないが、今後実際の地域の耐震化問題を考える際に、医療チームの配置とその派遣を同時に検討する必要があることを確認できたと考える。

今後、実際規模の問題に適用していくことが望まれるが、その際には、居住地への派遣元となる医療施設は最近隣の施設に限るというような制約を設け、変数の個数を絞り込んで、いわゆる「次元の呪い」を回避することが、定式化の手間と計算時間の短縮のためには重要となる。その具体的な方法については地域の実情を踏まえた検討が必要であるため、今後の研究にゆだねたい。

なお、本研究では、重傷者は救急医療施設への到着または派遣医療チームとの接触と同時に治療が行われると仮定しており、重傷者数に依存する待ち時間を無視している。この待ち時間の効果を含めるには、死亡リスクの中に重傷者数の 2 乗項を許す必要がある。整数変数を含む 2 次計画問題の効率的解法についての今後の研究の進展が望まれる。

**謝辞：**本研究の遂行に当たり、東北大学防災科学研究拠点メンバーとの議論が役立った。また計算作業について、東北大学工学研究科院生(現在仙台市)の佐々木和寛氏の助力を得た。記して感謝の意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 小池則満, 宇治和幸, 秀島栄三, 山本幸司, 深井俊英：震災時に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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 奥村誠, 堀内智司, 佐々木和寛：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・論文集, No. 26, pp. 93–100, 2009.
- 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) Free Software Foundation, Inc.: GLPK (GNU Linear Programming Kit)  
<http://www.gnu.org/software/glpk/glpk.html>, 2010.4.27.現在