

災害時における 2 次医療圏医療資源配分と搬送最適化

阪野 朱音^{†1}, 大場 春佳^{†2}, 水野 信也^{†1},

概要：本論文は大規模災害時の傷病者搬送において、車両数・搬送ルート・医療機関の収容能力を同時に考慮した搬送体制の評価を行うことを目的とした。実際の救護活動の様子を模して、搬送ルートを算出し、複合的な観点から搬送体制を評価した。

キーワード：災害医療、数理最適化、配送計画問題

1. はじめに

近年、日本における自然災害は激甚化・頻発化し、被害規模も増大している[1]。災害発生直後の医療対応においては、被災者の救命率が搬送時間に大きく依存することが広く知られている。こうした背景を踏まえ、本研究では 2 次医療圏を単位として、災害発生時の救急搬送ルートの最適化を試みる。具体的には、地理情報や重症者の優先度を考慮し、2 次医療圏における傷病者の搬送ルートモデルの構築と評価を行う。本モデルを用いることで、地域ごとの災害対応力を定量的に評価できるとともに、必要となる救急車の台数や病床数を推計に役立て、事前の避難計画や医療体制の準備に資することが期待される。

2. 傷病者搬送モデルの構築

2.1 傷病者搬送モデルの基本設定

本研究では対象地域を静岡県の中東遠 2 次医療圏とした。構築する傷病者搬送モデルでは、救護所、救護病院、および災害拠点病院を搬送先ノードとして設定した。静岡県医療救護計画[2]を参照し、以下に、各搬送先ノードの役割を整理する。

まず、軽症患者の受け入れとトリアージの窓口として救護所が設置される。そして、救護所では対処できない患者を救護病院や災害拠点病院へ搬送する。救護病院は中等症患者および重症患者の受け入れを行い、救護病院では対応できない重症患者を災害拠点病院へ搬送する。災害拠点病院ではほかの医療機関では対応困難な重症患者の受け入れを行うと同時に、他圏への航空搬送の拠点にもなる。

このような医療救護体制を踏まえて、本研究では、搬送先となる病院の種別を各傷病者の重症度によって異なるものとした。また、傷病者の重症度は、トリアージの判定に基づき、重症者、中等症者、軽症者の 3 つにカテゴライズした。さらに、各重症度の 1/3 の患者は救護所または病院に到着後に、それぞれ 1 段階ずつ重症化するという条件を設けた。

また、静岡県危機管理部消防保安課へ救護活動について

聞き取り調査を行ったところ、中等症者は同時に 2 名まで搬送可能である一方、重症者は同時に 1 名しか搬送しないということが明らかとなった。本研究においても、これらの知見をモデルの制約条件として取り入れた。

2.2 搬送ルートの構成

搬送ルートの構成は、実際の救護活動を模して、2 手に分けることとした。1 つ目に、傷病者と救護所間を回るルート、2 つ目に救護所に搬送された傷病者をさらに救護病院・災害拠点病院へ搬送するルートである。本研究においても、図 1 のよう 2 つのルートに表す。

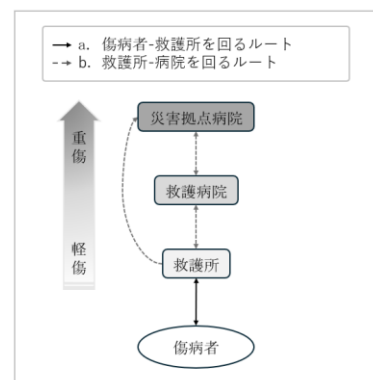


図 1 本研究で検討する 2 つの傷病者搬送ルート

以降、傷病者と救護所を回るルートを a ルート、救護所と病院間を回るルートを b ルートと記す。a ルートでは、容量制約付き配送計画問題（Capacitated Vehicle Routing Problem: CVRP）[3]に基づいた搬送ルートモデルを適用することとし、最適化計算によって解を求めた。また、b ルートは、a ルートの結果を受けて、傷病者の再搬送の必要性が決まるため、最適化ではなく、シミュレーションを行うこととした。以下には、a ルートの目的関数で使用する集合、パラメータ及び変数を示す。

a ルートの救急車集合： $M_a = \{1, 2, \dots\}$

$h_{2i} \geq 1$ ： $i \in H_2$ に属する各救護所の収容人数

c_{ij} ：拠点 i から拠点 j への移動費用または移動時間

$i, j \in V_1 \cup V_2 \cup H_2$

E ：拠点間を結ぶ辺の集合、各辺 $(i, j) \in E$,

^{†1} 順天堂大学

^{†2} 中央大学

$$i, j \in V_1 \cup V_2 \cup H_2$$

x_{ij}^m : 車両 m が拠点 i と j 間を移動する場合の変数

p_i : 重症者 i の優先度

t_i : 重症者 i が救護所に到着した時刻

u_i^m : 車両 m が拠点 i に到着したときの積載人数

$std(\cdot)$: 括弧内の標準偏差を求める関数

α : 総移動距離に対する重みパラメータ

β : 各車両の移動距離の偏りに対する重みパラメータ

γ : 重症者の搬送時間に対する重みパラメータ

θ : 各救護所の収容人数の偏りに対する重みパラメータ

a. ルートの目的関数式:

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \alpha \cdot \sum_{m \in M_a} \left(\sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij}^m \right) \\ & + \beta \cdot std_{m \in M_a} \left(\sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij}^m \right) \\ & + \gamma \cdot \sum_{i \in V} p_i \cdot t_i + \theta \cdot std_{h_2, i \in H_2} (h_{2i}) \\ & \alpha, \beta, \gamma, \theta \in \mathbb{R} \end{aligned} \quad (1)$$

a ルートの最適化における目的関数式は、上記のように定義した。第 1 項は、各車両の総移動距離の合計で、第 2 項は各車両の搬送距離の偏り、第 3 項は重症者の搬送にかかった時間の合計で、第 4 項は各救護所の収容人数の偏りを表している。

つぎに、b ルートを定義する。救護病院・災害拠点病院へ収容されていない中等症者、重症者は b ルートでの再搬送を必要とする。それに加え、自力で救護所へ避難した軽症者のうち、容態が悪化した者も救護病院または災害拠点病院への再搬送を行うものとした。具体的には、a ルートの計算後、傷病者が各救護所へ到着した時間を考慮し、その時間に救護所にいる救急車によって、傷病者の重症度に応じた病院へ搬送した。

2.3 搬送ルート最適化手法および数値計算環境

ルート a の最適化手法には、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) [4] を用いた。GA において、各個体は「各救急車が訪問する傷病者の巡回順序」を表す遺伝子列として表現した。遺伝的アルゴリズムは並列計算にて実施した。計算環境には、大阪大学 D3 センターのスーパーコンピュータ、SQUID を利用した。

3. 結果および考察

a, b ルートを同数の救急車で運用した結果、車両 1 台あたりの平均移動距離は a ルートが約 3970.2 km, b ルートが約 10896.9 km となり、b ルートは a ルートの約 2.75 倍に達した。このことから、初期搬送を担う a ルートと比較して、再搬送を担う b ルートでは移動距離が大きく増加し、同数の車両を配分する運用では非効率となる可能性が示された。

また、各病院に搬送された傷病者数と実際の病床数を比

較した結果、災害拠点病院では傷病者数の平均が約 2012 人であるのに対し、病床数の平均は 500 床にとどまり、救護所においても傷病者数の平均が約 1453 人に対して病床数の平均は 159 床と、大幅な病床不足が見込まれることが明らかとなった。この結果は、現行の医療受け入れ体制では、大規模災害時に発生する医療需要に十分対応できない可能性が高いことを示している。

さらに、各病院への傷病者到着時間と人数の関係を分析したところ、発災後 72 時間以内に病院へ到着する傷病者の割合は、いずれの病院においても約 7 割にとどまることが示された。このことから、救急搬送体制そのものの増強が不可欠であるといえる。以上の結果から、車両配分の最適化と医療資源不足を前提とした体制整備を同時に検討することが、災害時医療対応力の向上において重要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、2 次医療圏を対象として、車両数、搬送ルート、医療機関の収容能力を同時に考慮した災害時傷病者搬送モデルを構築し、搬送体制の定量的評価を行った。数値実験の結果、再搬送を担うルートにおける移動距離の増大や、各医療機関における病床数の大幅な不足、ならびに発災後 72 時間以内の搬送達成率が 7 割にとどまることが示され、初動対応および搬送体制の強化の必要性が明らかとなった。今後は、道路被害シナリオの導入、医療従事者数の制約などを組み込むとともに、複数の医療圏を対象とした分析を行うことで、より現実に即したかつ汎用性の高いシミュレーションモデルへの発展が求められる。

謝辞

研究成果の一部は、大阪大学 D3 センターの SQUID を利用して得られたものであり、ここに記して謝意を表します。さらに、研究の遂行に際し、有益なご意見やご協力をいただいたデータ提供にご協力くださいました静岡県危機管理部消防保安課ならびに関係機関の皆様深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 国土交通省 気象庁. "日本付近で発生した主な被害地震 (平成 8 年以降)". 気象庁各種データ・資料. 2025. https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/higai/higai1996-new.html?utm_source=chatgpt.com (参照日 2025-10-13)
- [2] 静岡県. "静岡県医療救護計画 (2019 年 4 月改定) 本文". 静岡県医療救護計画. 2019. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcapggpcjclefindmkaj/https://www.pref.shizuoka.jp/_res/projects/default_project/_page/_001/024/082/iryoku_kyugokeikaku.pdf, (参照日 2025-10-13)
- [3] Dantzig, George B., and John H. Ramser. The Truck Dispatching Problem. Management Science. 1959. Vol.6, No.1, pp80-91.
- [4] J. H. Holland. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Analysis of Some Adaptive Systems of Common Interest. The Univ. of Michigan Press. 1975.