

救急自動車の搬送時間信頼性と呼損率を考慮した最適配置モデル構築に関する研究

山田 雄太¹・加藤 哲平²・内田 賢悦³

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail:s02120233v@eis.hokudai.ac.jp

²学生会員 北海道大学大学院 工学院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail:ippet@eis.hokudai.ac.jp

³正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)
E-mail:uchida@eng.hokudai.ac.jp

本研究では、救急自動車が待機している消防署の最適な配置を提案する。道路ネットワークには多くの不確実性にさらされているため、移動時間は確率的に変動する。確率的に変動する移動時間分布を用いることで、救命できる救急患者数の期待値すなわち期待救命者数を算出する。また、近年、救急自動車が全て出動している間に別の出動事案が発生し、対処が遅れるというケースが発生している。このような状況を防ぐために、消防署館内の救急自動車がすべて出動中となるような確率すなわち救急自動車の呼損率を算出しある値以下となるような制約条件を設ける。本研究では、呼損率を制約条件とした期待救命者数を最大化するような機会制約付き最適化問題となっている。また、本研究で提案する手法と現行の手法による結果を比較し、現実社会との乖離を示す。

Key Words : road network, travel time reliability, loss probability, optimal allocation, Emergency Medical Services(EMS)

1. はじめに

高齢化社会が深刻な問題となりつつある日本では、救急需要が着実に増加している。平成26年中における救急自動車による全国の救急出動件数は、598万4921件と平成16年に初めて500万件を超えてからもほぼ一貫して増加傾向を続けている¹⁾。そのような状況では、救急患者を「早く」「正確に」搬送することが重要となるが、近年の日本では、救急自動車による現場到着所要時間及び病院収容時間もまた増加傾向にある。平成26年における現場到着時間の平均は8.6分と、10年前に比べ約2.3分延伸している¹⁾。また、病院収容時間の平均は39.4分で、10年前と比べ約9.4分延伸している¹⁾。救急需要に加え、搬送時間も増加傾向にある現状は深刻な問題である。

救急自動車による搬送時間の短縮には、救急自動車が待機している消防署の適正な配置が求められる。また、道路ネットワークは多くの不確実性にさらされているため、移動時間が確率的に変動する。搬送時間の確率的変動を考慮した施設配置に関する研究もいくつか行われている。高山ら²⁾は、消防署から医療機関までの所要時間分布を推計し、救急自動車の到着時間信頼性を考慮した消防署の

最適配置や管轄範囲(エリア)の最適化等を検討した。ここでは、移動時間のパーセンタイル値が信頼性の指標として用いられていた。しかし、救急自動車が消防署に常に待機していると仮定されており、救急自動車が出動中の場合を考慮していない。稲川ら³⁾は連続時間型マルコフ連鎖を用いて救急自動車の平均対応時間と救急車の対応可能性を算出した。それらを用いて、最適な施設配置を推計し、救急医療における確率要因の考察を行った。しかし、救急自動車の移動時間算出の際に交通量の影響などを考慮していない。

本研究では、救急自動車の搬送時間分布を所与とし、救命できる救急患者数の期待値を最大にするような消防署の最適配置モデルを提案する。一人でも多くの患者を救命することが救命救急の役割であるのに対し、本研究で示すように、救命可能な患者数を明確な指標とした施設配置問題は筆者らの知る限り存在しない。

また、近年の救急需要は、人口密度や高齢率が高い地域で多い。そのため、救急自動車が全て出動している間に別の出動事案が発生し、対処が遅れるケースが発生している⁴⁾。このような状況を防ぐために、本研究で提案するモデルは、消防署館内の救急自動車がすべて出動中とな

る確率がある値以下とする制約を付加した機会制約付き最適化問題となっている。本稿では、仮想ネットワークを対象に、本研究で提案する手法と現行の手法による結果を比較し、現実社会との乖離を示す。

2. 定式化

(1) 記号

本稿で用いる主な記号を以下に示す。

V_a	リンク a の交通量
C_a	リンク a の交通容量
r, β	BPR 関数のパラメータ
e	交通量影響軽減係数
l_a	リンク a の延長
s_a	リンク a の自由走行速度
T_a	リンク a の移動時間
cv_a	T_a の変動係数
b	症状別定数項
α	応急処置効果
$[I]$	救急需要点の集合
$[S]$	消防署の集合
$[J]$	救急病院の集合
K	経路集合
A	ネットワーク上でのリンク集合
$P_B^{s_n}$	消防署 $s_n \in S$ の全ての救急自動車が出動中であるときの確率
$Q_{i_{s_n}}^{s_n}$	消防署 s_n の管轄エリアの救急需要点 $i_{s_n} \in I_{s_n}$ における期待救命者数
$f_{od}^k(t)$	O-D ペア od 間の経路 k での移動時間の確率密度関数
D_i	救急需要点 i での需要数
$\delta_{od,a}^k$	リンク a が O-D ペア od 間の経路 k の一部であれば 1, それ以外のときは 0 となる変数
x_{si}	消防署 s から需要点 i までの直線距離
ρ	救急自動車の平均利用率
N_{s_n}	消防署 $s_n \in S$ における救急車の台数
λ	需要点 i での救急患者の平均発生率
μ	救急車の平均サービス率
T'	医療サービスにおける平均時間

(2) リンクの確率的移動時間

道路ネットワーク中のリンク $a \in A$ の移動時間は、式(1)に示す正規分布に従うものと仮定する。高山ら²⁾は救急自動車の移動時間を BPR 関数に交通量影響軽減係数 e を乗じることで表現した。本稿でも同様に救急自動車の移動時間を表現している。リンク移動時間の共分散は変動係数 cv_a を用いて式(3)で表現している。なお、移動時間の平均値は、交通量の平均値の関数として与えられるもの

とする。

$$T_a \sim N(E[T_a(V_a)], \text{var}[T_a(V_a)]) \quad (1)$$

where

$$E[T_a(V_a)] = \frac{l_a}{s_a} \left\{ 1 + e \cdot r \left(\frac{V_a}{C_a} \right)^\beta \right\} \quad (2)$$

$$\text{cov}[T_a(V_a), T_b(V_b)] = cv_a \cdot cv_b \cdot E[T_a(V_a)] \cdot E[T_b(V_b)]$$

$$(\text{if } a=b, \text{ cov}[T_a(V_a), T_b(V_b)] = \text{var}[T_a(V_a)]) \quad (3)$$

消防署 s から救急需要点 i までの経路 k の移動時間 T_{si}^k は正規分布に従うものと仮定し、式(4)で与えた。

$$T_{si}^k \sim N \left(\sum_{a \in A} \delta_{si,a}^k \mu_a, \sum_{a \in A} \sum_{b \in A} \delta_{si,a}^k \delta_{si,b}^k \sigma_{ab} \right) \quad (4)$$

(3) 救急患者の収容時間と救命率の関係

疾患によって違いはあるが、救急患者の救急事案発生から救急車が到着するまでの時間 t と患者の死亡率 R の間には、相関がある。橋本ら⁵⁾は長崎地区の救急搬送のデータから脳内出血やCPU(心肺停止)などいくつかの疾患で疾患別に病院収容時間と救命率の関係を算出している。本稿ではその相関関係をCaraの救命曲線を用いて表す。福田ら⁶⁾と同様に、式(4)で表されるCaraの救命曲線を想定した。

$$R(t) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(4.80861 - b \cdot \alpha \cdot t)} \quad (5)$$

(4) 期待救命者数の定式化

救急需要点 $i_{s_n} \in [I]$ で発生する救急患者数 D_i と、消防署 s_n から救急需要地 i_{s_n} までの経路 k の移動時間 T_{si}^k と死亡確率 $R(t)$ を用いることで、救急需要点 $i_{s_n} \in [I_{s_n}]$ における救命できる患者数の期待値を式(6)のように表すことが出来る。なお、 T_{si}^k の確率密度関数を $f_{si}^k(t)$ とする。

$$Q_{i_{s_n}}^{s_n} = \sum_{i_{s_n} \in [I_{s_n}]} \int_0^\infty D_{i_{s_n}} f_{s_n i_{s_n}}^{k^*}(t) R(t) dt \quad (6)$$

$$k^* = \arg \max_{k \in K} \int_0^\infty f_{s_n i_{s_n}}^k(t) R(t) dt \quad (7)$$

式(7)は救急需要点 $i_{s_n} \in [I]$ における期待救命患者数を最大にする経路 k^* を救急自動車を選択することを表す。

(5) 呼損率の定式化

消防署 s_n の救急自動車ですべて出動中の確率すなわち呼損率 $P_B^{s_n}$ は式(8)のようにアーランのB式を用いて定式化した。詳細は参考文献7)を参照頂きたい。

$$P_B^{s_n} = \frac{\rho^{N_{s_n}}}{N_{s_n}!} \sum_{l=1}^{N_{s_n}} \frac{\rho^l}{l!} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (9)$$

$$\frac{1}{\mu} = t_{si} + t_{ij} + t_{js} + T' \quad (10)$$

$$t_{si} = \sum \delta_{si}^k \mu_a \quad (11)$$

$$t_{od} = \min_k \left\{ \sum_{a \in A} \delta_{od,a}^k \mu_a \right\} \quad \forall o \& d \in \{j, s\} \quad (12)$$

式(9)は平均利用率を表している。また、本稿では、救急需要点 i_{s_n} での救急患者の発生確率分布は平均 λ のポアソン分布に従うと仮定する。式(10)における $1/\mu$ は救急自動車の平均サービス時間を表す。救急自動車は消防署から救急需要点、救急病院を経て消防署に戻ってくるために要する平均移動時間と医療行為に要する平均時間の和で表せる。また、式(11)で表すように救急自動車のドライバーの経路選択は期待救命者数が最大となるような経路を選択すると仮定する。

3. 機会制約付き最適化問題

救急自動車の呼損状態を考慮した救命できる期待救命患者数の最大化する消防署の施設配置問題は式(13)-(17)に示すように定式化できる。

$$\max_{s_n \in S} Q = \sum_n \sum_{i_{s_n}} (1 - P_B^{s_n}) Q_{i_{s_n}}^{s_n} + \sum_n \sum_{i_{s_n}} \sum_k P_{n,i_{s_n}}^m Q_{i_{s_n}}^{s_k} \quad (13)$$

s.t.

$$\max_{\rho} P_B^{s_n} \leq \varepsilon \quad (14)$$

where

$$P_{n,i_{s_n}}^m = (1 - P_B^{s_{m+1}}) \prod_{j=1}^m P_B^{s_j} \quad (15)$$

$$\sum_{n \in N} s_n = S \quad (16)$$

$$\sum_{n \in N} I_{s_n} = I \quad (17)$$

式(8)より呼損率は平均利用率 ρ に依存する。本稿では、救急自動車呼損状態となる最悪の状態を避けるために、呼損率 $P_B^{s_n}$ の最大がある値 ε 以下となるように式(14)に定式化した。また、すべての消防署 s_n で式(14)は成立する。式(15)は消防署 s_n において救急自動車すべてが出動中であり、消防署 s_n の管轄エリア外から m 番目に近い消防署

s_k から救急自動車が駆けつける確率を示している。また、本稿では呼損率は、各消防署において独立であると仮定する。式(16)(17)は要素の総和が全体集合となることを示している。

4. 既存の消防署配置の定式化

これまで、消防署 $s_n \in [S]$ から救急需要地 $i_{s_n} \in [I]$ までの距離 x_i をできるだけ均等にするような消防署の配置がなされている⁴⁾。このような、現行の消防署配置決定問題は、以下の最小化問題の解で表現される。

$$\min_{s \in [S]} \sum_{i \in [I]} (\bar{x}_{si} - x_{si})^2 \quad (18)$$

ここで、 \bar{x}_i は x_i の平均を表す。

5. 数値実験

本稿では3で求められた既存の消防署の配置 s' と4で求められる新たに提案した消防署の配置 s^* を比較する。具体的には、以下のテストネットワーク上で、消防署を二つ配置するとする。それぞれの消防署の配置モデルによって算出された消防署配置で救急患者の平均死亡人数を比較する。結果は発表時に示す。

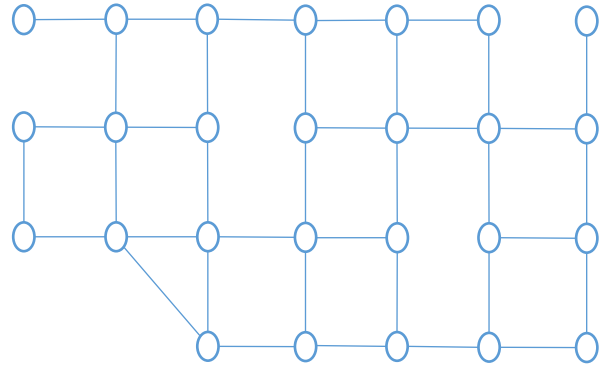


図1 テストネットワーク

参考文献

- 1) 平成 27 年版 消防白書 総務省消防庁
- 2) 高山純一, 黒田昌生: 救急車の走行時間信頼性からみた救急力拠点の最適配置に関する研究, 日本都市計画学会論文集, pp. 595-600, (2000)
- 3) 稲川敬介, 古田壮宏, 鈴木敦夫: 救急車の配置計画における確率的指標とその重要性について, 日本都市計画学会論文集, pp. 469-474, (2007)
- 4) 救急需要増加に伴う救急隊の適正配置等に関する研究について 救急隊の適正配置に関する研究 札幌

- 市消防局
- 5) 橋本孝来,栗原正紀,井上健一郎,岩崎義博,藤本昭: 救急患者収容時間と救命率の関係,日本臨床救急医学会 (2002)
- 6) 福田正輝, 高山純一, 中山昌一郎: 三次救急搬送活動を対象とした医療情報デジタル伝送システム運用のためのアンテナ基地局配置方策に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 27 no. 1 (2010)
- 7) 川島幸之助, 塩田茂雄, 河西憲一, 富泉洋, 会田雅樹: 待ち行列理論の基礎と応用, pp59-61, (2014) 共立出版

**AN OPTIMAL ALLOCATION MODEL OF FIRE STATION CONSIDERING
TRAVEL TIME RELIABILITY AND LOSS PROBABILITY**
Yuta YAMADA, Teppei KATO and Kenetsu UCHIDA

This paper proposes an optimal allocation model of a fire station in which ambulances stand by. Travel time is described as probability distribution due to uncertainties in the road network. Considering the uncertainties of travel time, expected survival patients can be formulated. A case is increasing where all ambulances are being dispatched, the other emergency call occurs. To prevent such situation, the probability that all ambulances are dispatched, i.e., loss probability, is formulated as constraint. Therefore, an chance constrained optimization problem is formulated. Numerical experiments are carried out to demonstrate the difference between the real location and the optimal location.