

救急自動車の搬送時間信頼性と救急患者の救命率を考慮した 消防署の最適配置に関する研究

A study on the optimal allocation problem of the fire station considering
the travel time reliability of emergency vehicles and the survival rate for serious patients

北海道大学工学部 ○学生員 山田 雄太 (Yuta Yamada)
北海道大学大学院工学研究院 学生員 加藤 哲平 (Teppei Kato)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 内田 賢悦 (Kenetsu Ucida)

1. はじめに

高齢化社会が深刻な問題に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25年における救急自動車による全国の救急出動件数は、590万9,367件と、前年と比較して10万6,912件増加しており、10年以上増加傾向が続いている¹⁾。救急搬送では、患者を「早く」搬送することが非常に重要となるが、日本では近年、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25年における現場到着時間の平均は8.5分と、10年前に比べ約2.2分延伸している²⁾。また、病院収容時間の平均は39.3分で、10年前と比べ約9.9分延伸している³⁾。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、移動時間の確率的な変動も考慮する必要がある。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として、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。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。本研究では、救急車の搬送時間分布をそのまま用い、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、人口密度や高齢者率が高い地域で多い。このため、救急自動車全てが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⁾。このような状況が起らないよう、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ような確率を制約条件としている。また、提案したモデルで与えられる消防署の最適配置と現行の消防署配置を比較し現実社会へのインプリケーションを示す。

2. 定式化

2.1 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	B.P.R. 関数のパラメーター
e	交通量影響軽減係数
l_a	リンク a の長さ
v_a	リンク a における自由速度
cv_a	T_a の変動係数
b	症状別定数項
α	応急処置効果
T	救急自動車の搬送時間
$[I]$	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
$f_{od}^k(t)$	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	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、それ以外の場合は 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	消防署 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到着率
μ	救急車の平均サービス率
T'	医療サービスにおける時間

2.2 リンクの確率的移動時間

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 B.P.R. 関数に交通量影響軽減係数 e を乗じることで救急自動車の移動時間を表現した。本稿ではこの移動時間関数を、救急自動車のリンク a の移動時間の期待値として用いる。リンク移動時間の共分散は変動係数 cv_a で与えている。

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

where

$$E[T_a(V_a)] = \frac{l_a}{v_a} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(\frac{V_a}{C_a} \right)^\beta \right\} \quad (2)$$

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

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

2.3 救急患者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。

$$R(t) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(4.80861 - b \cdot \alpha \cdot t)} \quad (4)$$

2.4 期待救命者数の最大化問題

消防署 s から救急需要地 i までの経路 k の確率的移動時間 T_{si}^k は式(5)で与えられると仮定する。また、 T_{si}^k の確率密度関数を $f_{si}^k(t)$ とする。

$$T_{si}^k \sim N \left(\sum_{a \in A} \delta_{si,a}^k \mu_a, \sum_{a \in A} \sum_{b \in A} \delta_{si,a}^k \delta_{si,b}^k \sigma_{ab} \right) \quad (5)$$

$f_{si}^k(t)$ と救急需要地 $i \in [I]$ で発生する救急患者数 D_i 、病院収容時間に対応した死亡率 $R(t)$ を用いることで、救急需要地 $i \in [I]$ において救命できる患者数の期待値を表すことが出来る。救命できる期待患者数の最大化する施設配置問題は式(6)-(13)に示すように定式化される。

$$\max_{s \in [S]} Q = \sum_{i \in [I]} \int_0^\infty D_i f_{si}^k(t) R(t) dt \quad (6)$$

s.t.

$$P_B \leq \varepsilon \quad (7)$$

where

$$k^* = \arg \max_{k \in K} \int_0^\infty f_{si}^k(t) R(t) dt \quad (8)$$

$$P_B = \frac{\rho^N}{N_s!} \bigg/ \sum_{i=0}^N \frac{\rho^i}{i!} \quad (9)$$

$$\rho = \lambda / \mu \quad (10)$$

$$\frac{1}{\mu} = t_{si} + t_{ij} + t_{js} + T' \quad (11)$$

$$t_{si} = \sum \delta_{si,a}^k \mu_a \quad (12)$$

$$t_{od} = \min_k \left\{ \sum_{a \in A} \delta_{od,a}^k \mu_a \right\} \quad \forall o \& d \in \{j, s\} \quad (13)$$

式(8)は、救急需要地 $i \in [I]$ 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。式(7)は、救急車がすべて出動中である確率すなわち救急車の呼損率 P_B をある値 ε 以下とする制約条件を表す。呼損率 P_B の定式化については川島ら⁷⁾を参照頂きたい。また、

需要点 i での救急患者の発生確率分布はポアソン分布であると仮定する。式(11)における $1/\mu$ は救急自動車が出動から消防署へ帰還するのに要する時間の期待値を表す。これは、式(11)で示すように、救急自動車が消防署から需要点、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、医療行為に要する時間の和で表せる。

2.5 既存の消防署配置の定式化

これまで、消防署 $s \in [S]$ から救急需要地 $i \in [I]$ 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きた¹⁾。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。

$$\min_{s \in [S]} \sum_{i \in [I]} (\bar{x}_{si} - x_{si})^2 \quad (14)$$

ここで、 $\bar{x}_i$ は x_i の平均を表す。

2.6 消防署の配置の評価

高山²⁾らは搬送にかかる総所要時間が20分を超過するものについて、その超過分の総和を最小化にする消防署の配置を分析した。本稿では2.5で求められた既存の消防署の配置 s^1 と2.4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、テストネットワーク上で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。

3 まとめ

本稿では、救急患者の死亡率を最小化するような消防署の新たな配置モデルを作成した。また、発表時に示す数値実験でこのモデルと既存の消防署配置モデルを比較し評価した。

参考文献

- 1) 平成26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、中山昌一朗：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、pp.59-61、(2014)共立出版