病院までの搬送を考慮した救急車の最適配置

02004830 筑波大学 *大山 崇 OHYAMA Takashi
01205430 筑波大学 鈴木 勉 SUZUKI Tsutomu

1　はじめに

我が国の救急医療体制は量的には充実しており，救急車は全国でおよそ4,500台，東京23区で138台(平成11年)整備されている．電話による通報で現場には平均5.3分（東京消防庁管内）で到着する．しかし，救急車に乗車している救急隊員は本格的な医療行為をすることはできない．従って，病院まで搬送して医療サービスを受けるまでの搬送時間も待ち時間として考慮しなければならない．通報から病院到着までは平均約27分もかかっており，救命率の向上の妨げになっている．Berman et al.(1985)やBrandeau(1992)は，患者の医療サービスを受けるまでの待ち時間が最小になるように救急車を配置するモデルを作成したが，本論文では，我が国へ適用できるモデルとして，病院までの搬送をも考慮した救急車最適配置モデルを定式化し，収容する病院の位置によって最適配置がどのような影響を受けるかを調べる．

2　救急車配置モデルの定式化

n個のノードを$\mathbf{a}_1,\ldots,\mathbf{a}_n$, m個の病院を$\mathbf{b}_1,\ldots,\mathbf{b}_m$とする．$\mathbf{a}_i$の重み（救急需要）を$h_i(\sum_{i=1}^{n}h_i=1)$とする．$\mathbf{a}_i$ではパラメータ$\lambda h_i$のポアソン過程に従って救急車を呼ぶ．施設には救急車がs台あるとし，待機中の車があれば直ちに出動してそのノードに行き，そのノードから最も近い病院に収容する．ただし，収容の作業に時間t（定数）がかかるとする．待機中の救急車がなければ，車が施設に帰ってくるのを待って，帰り次第直ちに出動させる．このとき，救急車の待機する施設を連続平面上に配置する問題を考える．２点間の距離dはユークリッド距離とする(後でgradientをとる時の都合により，十分小さい正数ϵを使ってperturbする)．$\mathbf{a}_i$に最も近い病院を$\mathbf{b}_{i_0}(i_0\in\{1,\ldots,m\})$とする．施設の位置を$\mathbf{x}$とし，車の速度が$v$の時の１回の出動の平均サービス時間$\overline{S}(\mathbf{x})$と２次モーメント$\overline{S^2}(\mathbf{x})$は，

$$\overline{S}(\mathbf{x})=\sum h_iE\left[\frac{d(\mathbf{x},\mathbf{a}_i)+d(\mathbf{a}_i,\mathbf{b}_{i_0})+d(\mathbf{b}_{i_0},\mathbf{x})}{v}+t\right]$$

$$\overline{S^2}(\mathbf{x})=\sum h_iE\left[\frac{d(\mathbf{x},\mathbf{a}_i)+d(\mathbf{a}_i,\mathbf{b}_{i_0})+d(\mathbf{b}_{i_0},\mathbf{x})}{v}+t\right]^2$$

患者が救急車を呼んでから直前の患者のサービスを終えて施設に戻るまでの平均待ち時間$\overline{Q}(\mathbf{x})$は，

・$s=1$の時, Pollaczek-Khinchinの公式により，

$$\overline{Q}(\mathbf{x})=\frac{\lambda\overline{S^2}(\mathbf{x})}{2(1-\lambda\overline{S}(\mathbf{x}))}$$

・$s>1$の時, サービス時間の変動係数$c_s=\sqrt{Var}/\overline{S}$, $a=\lambda\overline{S}$, $\rho=a/s$,

$$p_0=1/\left\{\sum_{i=0}^{s-1}\frac{a^i}{i!}+\frac{a^s}{(s-1)!(a-s)}\right\}$$

を使えば,

$$\overline{Q}(\mathbf{x})\approx\left(\frac{1+c_s^2}{2}\right)\frac{s^{s-1}\rho^s}{s!\overline{S}(1-\rho)^2}p_0$$

となる(Brimberg et al.(1997)等)ので，患者が救急車を呼んでから病院に収容されるまでの平均待ち時間は，

$$\overline{T}(\mathbf{x})=\overline{Q}(\mathbf{x})+\sum_{i=1}^{n}h_iE\left[\frac{d(\mathbf{x},\mathbf{a}_i)+d(\mathbf{a}_i,\mathbf{b}_{i_0})}{v}+t\right]$$

となる．この関数は$s>1$の時は凸かどうかはわからないが，最急降下法

$$\mathbf{x}_{(r+1)}=\mathbf{x}_{(r)}-\frac{G(\mathbf{x}_{(r)})}{g(\mathbf{x}_{(r)})}$$

を適用する(ここで, Gは$\overline{T}(\mathbf{x})$のgradient, gはGの関数)と，$\overline{T}(\mathbf{x})$が極小となる配置を得られる．

3　数値実験

例1: 図1のようにノードを25個配置し，病院の位置によりどのくらい救急車施設の最適な位置が変わるかを調べた．ここで，隣り合うノード間の距離は80，需要h_iは$\frac{1}{25}$とし，$\lambda=0.5, v=1000, s=1$とした．図2は，病院を１つ与え，その位置をWeber点から右に移動させた時の最適点の変化を表している．病院がWeber点から遠ざかるにつれ，最適点は病院方向に，tが大きいほど寄せられる．図3は，病院を２つ与え，片方の病院を左端Lまたは右端Rに固定し，他方をWeber点から右に移動させた時の最適点の変化である．２つの病院が同じ側にある場合は，最適点は病院方向に寄るが，反対側にある場合は他方の病院が極端に遠くならない限り，Weber点の近くとなる．この実験において，$\lambda=0.1$のように需要が少ない場合には，最適点はWeber点からのずれは小さくなる．一方の病院をWeber点に固定すると最適点はWeber点から動かない．

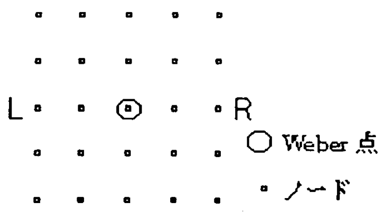

図1: 需要の位置とWeber点

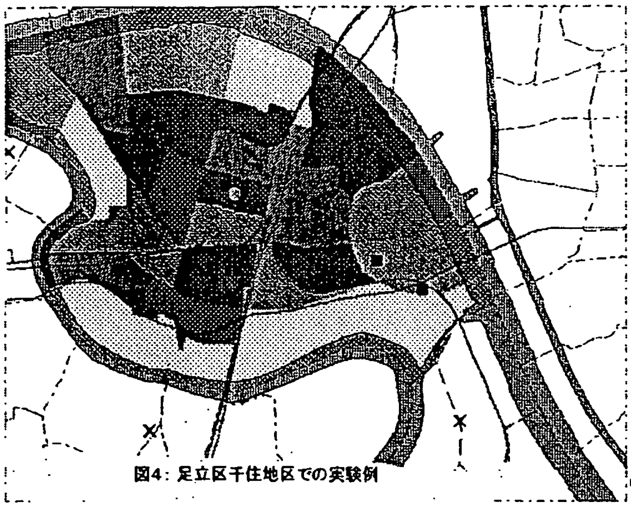

図4: 足立区千住地区での実験例

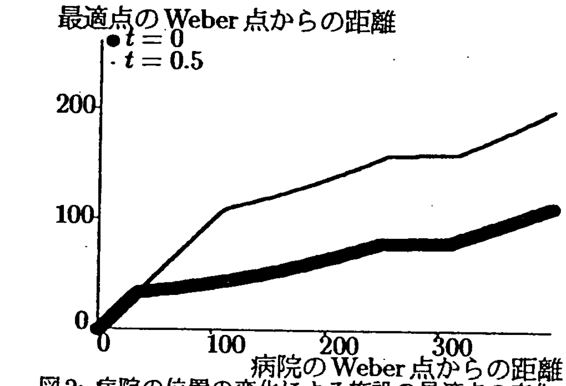

図2: 病院の位置の変化による施設の最適点の変化

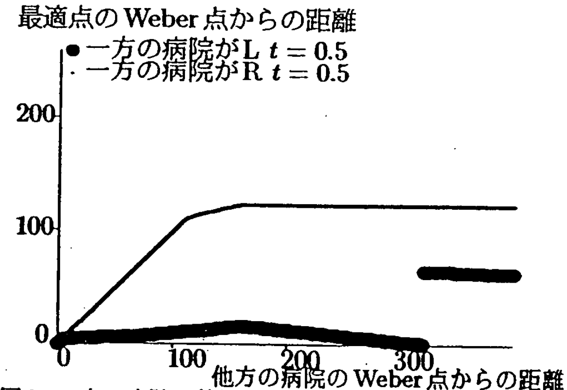

図3: 一方の病院の位置の違いによる施設の最適点の変化

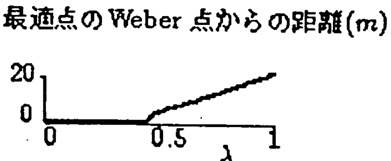

図5: λの変化による施設の最適点の変化

例2: 図4のように東京都足立区千住地区において，町丁目ごとに代表点と人口を与え，発生頻度を東京消防庁(1998)に従い$\lambda = 0.2517$(回/時間), $t = 38$(分)とし，救急車の速度vを都内一般道の平均時速に近い22km/hとして数値実験を行った．千住消防署に救急車がある場合は$\overline{Q} = 46.04$(分), 最適点はWeber点と一致し，このとき$\overline{Q} = 45.98$(分)となった．僅かではあるが，最適配置にすることで時間を短縮できる．高齢化等の影響を考えるため，救急需要を変えてみると，図5のように需要が倍近い水準になると，最適点はWeber点から離れていくことがわかった．

4 結論と今後の課題

病院への搬送を考慮した救急車の配置モデルを開発した．現実の収容時間や発生頻度の水準では，最適点の位置はWeber点と一致するが，収容時間や発生頻度が大きくなるとWeber点から離れることが確認された．千住地区の場合は，待ち時間は最適点から多少離れていてもあまり変わらないが，これは病院分布や人口分布が偏在していないためであると考えられる．他地域への適用とともに，救急車を複数の場所に置ける場合や，ドクターカーのようなシステムを導入した場合，病院のたらい回しの問題，傷病者の重度で優先順位を考慮する場合などは今後の課題である．

謝辞: 本研究の推進に際し，筑波大学の中川享規君に大変お世話になりました．ありがとうございました．

参考文献

1. Berman, O., Larson, R. C. and Chiu, S. S. 1985. Optimal server location on a network operating as an M/G/1 queue. *Opns. Res.*, **33**, 746-770.
2. Brandeau, M. L. 1992. Characterization of the stochastic median queue trajectory in a plane with generalized distances. *Opns. Res.*, 40, 331-341.
3. Brimberg, J., Mehrez, A. and Wesolowsky, G. O. 1997. Allocation of queueing facilities using a minimax criterion. *Loc. Sci.*, **5**, 89-101.
4. 東京消防庁．1998．平成9年救急活動の実態．