

平均救命率最大化を目的としたドクターヘリの最適配置 愛知県を例として

2011SE001 足立澄哉 2011SE043 平川楓

指導教員：佐々木美裕

1 はじめに

この論文は古田・田中 [2] のモデルを愛知県に適用した場合の分析を行うことを目的とする。

近年、少子高齢化により高齢者が増加し、それに伴い医療における治療の効率化が重要となる。効率化には様々な方法があるが、その中のひとつにドクターヘリの普及が挙げられる。本稿では、カーラーの救命曲線を元にした死亡率の最小化を目的として古田・田中 [2] の提案したランデブーポイント（以降 RP）の最適配置場所を求める RP 配置モデル、RP とドクターヘリの最適配置場所を求める同時配置モデルに加え、ドクターヘリを既に配備している病院を考慮した上で RP の最適配置場所と新規にドクターヘリを配備する最適場所を求める追加配置モデルを新たに提案する。

2 ドクターヘリとは

ドクターヘリとは救急医療用の医療機器が設置され、救急医療専門医及び看護師などが同乗して救急現場に向かい、現場等から医療機関に搬送するまでの間、患者に救急医療を行うことができる専用のヘリコプターのことである。ドクターヘリの導入は救急車のみで患者を搬送する場合に比べ治療開始までの時間が短縮されるため、救命率や予後の改善が期待される。実際、ドクターヘリ導入後の救命率は従来より 3 割上昇し、完治した人の数は 1.5 倍になっている。ドクターヘリの出動は主に、救急現場に到着した救急車の救急隊の要請によるものである。救急隊が現場で患者の状況を判断し、ドクターヘリが必要な場合は要請をしてドクターヘリが離着陸できる場所まで救急車で搬送する。その後 RP にてドクターヘリに乗せた患者の治療を始める。ドクターヘリは救急車とは異なり駐車場や道端等に停める事は出来ない。従って離着陸するための場所となる RP が必要であり、ドクターヘリの効率的な運用には RP の配置が重要である。河川敷や学校のグラウンドを離着陸場所として利用する場合もあるが、本稿では RP 以外の離着陸場所を利用しないものとする。以降、救急車の配備は既に一定の水準に達しているという仮定の下でモデルを考えている。

3 時間の求め方

治療を開始するまでの時を以下のように仮定する。対象地域を一辺が 100km の正方領域とし中心を原点とする直交座標系を導入し、それぞれの座標を需要点は (x, y) 、RP は (x_r, y_r) 、病院は (x_e, y_e) と仮定する。ドクターヘリの速度を v 、救急自動車の速度を w とし、ド

ドクターヘリシステムの仕組み (RPの使い方)

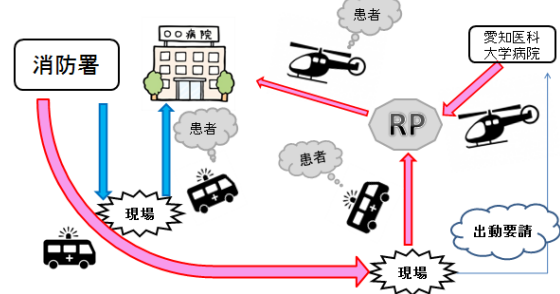


図1 ドクターヘリの仕組み

クターヘリの医師による治療開始までの時間を T_D 、直接救急自動車て病院に搬送する時間 T_A を求める。これらの移動距離はユークリッド距離を使う。

T_D は、ドクターヘリと救急自動車の待ち合わせを考慮するので

$$\max \left\{ \frac{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2}{w}, \frac{(x_r - x_e)^2 + (y_r - y_e)^2}{v} \right\}$$

と表すことができ、 T_A は

$$\frac{(x_e - x)^2 + (y_e - y)^2}{w}$$

と表せる。 T_D 、 T_A よりある需要点に対する治療を開始するまでの時間はこれらの最小値 $\min\{T_D, T_A\}$ と表すことができる。なお、ドクターヘリと救急自動車の速度は古田・田中 (2) の論文と同様にドクターヘリは 200km/h、救急自動車は 40km/h とする。

4 定式化

RP 配置モデルの変数を以下の様に定義した。

I : 需要点の添え字集合

J : RP の整備候補点の添え字集合

p : 整備する RP の数

w_i : 需要点 $i \in I$ の需要量

t_i^A : 最寄の病院までの救急自動車による搬送時間

t_{ij}^R : 需要点 i が RP j にて、ドクターヘリによるサービスを受けるために必要な時間

$f(t)$: 治療開始に要する時間 t に対する死亡率を表すロジスティック関数

決定変数を以下に示す。

$$x_j = \begin{cases} 1: & \text{RPを} j \text{ に整備する場合} \\ 0: & \text{上記以外} \end{cases}$$

$$z_i = \begin{cases} 1: & \text{需要点} i \text{ が救急車で直接搬送する場合} \\ 0: & \text{上記以外} \end{cases}$$

$u_{ij} = \begin{cases} 1: & \text{需要点 } i \text{ が R P } j \text{ にてドクターヘリによる治療を受ける場合} \\ 0: & \text{上記以外} \end{cases}$ で表される. 式 (8) は, R P 配置モデルと同様に総死亡者数の最小化を表す.

R P 配置モデルの目的関数は

$$\min \sum_{i \in I} w_i \{ f(t_i^A) z_i + \sum_{j \in J} f(t_{ij}^R) u_{ij} \} \quad (1)$$

で表される. 式 (1) は, 総死亡者数の最小化を表す.

制約条件を以下に示す.

$$\text{s.t. } u_{ij} \leq x_j \quad i \in I, j \in J \quad (2)$$

$$z_i + \sum_{j=1} u_{ij} = 1 \quad i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{j=1} x_j = p \quad (4)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad j \in J \quad (5)$$

$$z_i \in \{0, 1\} \quad i \in I \quad (6)$$

$$u_{ij} \in \{0, 1\} \quad i \in I, j \in J \quad (7)$$

式 (2) は, 候補点 j に R P を整備した場合のみ需要点 i がドクターヘリによる治療を受けられる事を表す. 式 (3) は救急車のみでの直接搬送か, ドクターヘリを利用しての搬送のどちらかである事を示す.

式 (4) は R P の総数 p を示す. 式 (5), (6), (7) は 0-1 制約である. なお, 需要点 i から病院への搬送する際実際には様々な方法があるが, この論文では救急車による搬送かもしくは救急車とドクターヘリでの搬送のどちらかの方法で搬送するものとして式 (5), (6), (7) で表した.

次に同時配置モデルを考える. R P 配置モデルに加え, 新たに使う変数を以下の様に定義した.

K : ドクターヘリの整備候補点の添え字集合

q : 配備するドクターヘリの台数

t_{ijk}^B : 需要点 i が R P j にて, 病院 k のドクターヘリによる治療開始までの時間

同時配置モデルで新たに使う決定変数を以下に示す.

$$y_k = \begin{cases} 1: & \text{ドクターヘリを病院 } k \in K \text{ に配備する場合} \\ 0: & \text{上記以外} \end{cases}$$

$$v_{ijk} = \begin{cases} 1: & \text{需要点 } i \text{ が病院 } k \text{ に配備されたドクターヘリ及び R P } j \text{ を利用する場合} \\ 0: & \text{上記以外} \end{cases}$$

同時配置モデルの目的関数は

$$\min \sum_{i \in I} w_i \{ f(t_i^A) z_i + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} f(t_{ijk}^B) v_{ijk} \} \quad (8)$$

以下に制約条件を示す.

$$\text{s.t. } \sum_{k \in K} v_{ijk} \leq x_j \quad i \in I, j \in J \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} v_{ijk} \leq y_k \quad i \in I, k \in K \quad (10)$$

$$z_i + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} v_{ijk} = 1 \quad i \in I \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} y_k = q \quad (12)$$

$$y_k \in \{0, 1\} \quad k \in K \quad (13)$$

$$v_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i \in I, j \in J, k \in K \quad (14)$$

式 (9) は, 候補点 j に R P を整備した場合のみ需要点 i が病院 k に配備されたドクターヘリによる治療を受けられる事を表す. 式 (10) はドクターヘリを病院 k に配備した場合のみドクターヘリが利用できる事を表す. 式 (11) は式 (3) と同様に, 救急車のみでの直接搬送か, ドクターヘリを利用しての搬送のどちらかである事を示す. 式 (12) は (4) 同様, R P の総数 p を示す. 式 (13), 式 (14) は 0-1 制約で, それぞれドクターヘリを病院 k に配備するかどうか, 需要点 i が病院 k に配備されたドクターヘリおよび R P j を利用するかどうかを示している.

次に, 追加配置モデルを考える. 新たに使う変数を以下の様に定義した.

K : ドクターヘリが既に配備されている病院の添え字集合

L : ドクターヘリを新規に配備する候補病院の添え字集合

t_{ijl}^C : 需要点 i が R P j にて, 病院 l に新規に配備されたドクターヘリによるサービスを受けるために必要な時間

追加配置モデルで新たに使う決定変数を以下に示す.

$$y_l = \begin{cases} 1: & \text{ドクターヘリを病院 } l \text{ に新規に配備する場合} \\ 0: & \text{上記以外} \end{cases}$$

$$v_{ijl} = \begin{cases} 1: & \text{需要点 } i \text{ が病院 } l \text{ に新規に配備されたドクターヘリ及び R P } j \text{ を利用する場合} \\ 0: & \text{上記以外} \end{cases}$$

追加配置モデルの目的関数は

$$\min \sum_{i \in I} w_i \{ f(t_i^A) z_i + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} f(t_{ijk}^B) u_{ijk} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} f(t_{ijl}^C) v_{ijl} \} \quad (15)$$

で表される. 他のモデルと同様に総死亡者数の最小化を

表す.

以下に制約条件を示す.

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in L} v_{ijl} \leq x_j \quad i \in I, j \in J \quad (16)$$

$$\sum_{l \in L} v_{ijl} \leq y_l \quad i \in I, j \in J \quad (17)$$

$$z_i + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} u_{ijk} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} u_{ijl} = 1 \quad i \in I \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} y_k = q \quad (19)$$

$$y_l \in \{0, 1\} \quad l \in L \quad (20)$$

$$u_{ijk} \in \{0, 1\} \quad i \in I, j \in J, k \in K \quad (21)$$

$$v_{ijl} \in \{0, 1\} \quad i \in I, j \in J, l \in L \quad (22)$$

式 (16) は、候補点 j に RP を整備した場合のみ需要点 i が病院 l に新規配備されたドクターヘリによる治療が受けられる事を示す. 式 (17) は、ドクターヘリを病院 l に新規に配備した場合のみ需要点 i が病院 l に配備されたドクターヘリによる治療を受けることができることを示す. (18) は式 (3) と同様に、救急車のみでの直接搬送か、新規配備もしくは既に配備されているドクターヘリを利用しての搬送のどちらかであることを示す. 式 (19) はドクターヘリを新規に配備する病院の数を表す. 式 (20), (21), (22) は 0-1 制約で、式 (20) は病院に新規にドクターヘリを配備するかどうかを示し、式 (21), (22) は需要点 i が病院 k または病院 l に配備されたドクターヘリ及び候補点 j に整備された RP を利用しての搬送かどうかを示す.

5 愛知県におけるドクターヘリ事情の分析

今現在、愛知県でドクターヘリを配備している病院は愛知医科大学病院の 1 棟である. そのドクターヘリを利用した場合の主な搬送先の病院は 22 棟あり、愛知県北西部に集中している. 古田・田中 [2] の論文で検証していた千葉県と比べ、人口に対する病院数はほぼ同じであるにもかかわらずドクターヘリの配備数が少ないため、より効率的な運用が必要となってくる.

愛知県の総人口数は 7,105,158 人で、本稿では人口を需要量とし、平成 24 年の国勢調査における地域メッシュ統計から 5 倍地域メッシュを作り (図 2) その中心点を需要点とした. その地図を図 7 に示す. 5 倍地域メッシュは 233 個あり、メッシュ内の人口を円の面積で示した. それに加え地図 7 には救急車による搬送先病院 63 棟を正方形で、唯一ドクターヘリを有する愛知医科大学を病院の地図記号で、愛知以下大学病院のドクターヘリによる搬送を受け入れる主な病院 22 棟を \times で示した. この 233 個の需要点は RP の候補点でもあるとする. 同時配置モデル、追加配置モデルで

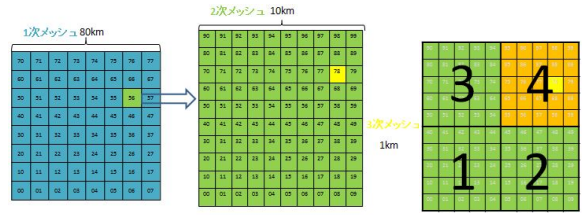


図 2 5 倍地域メッシュデータの作成

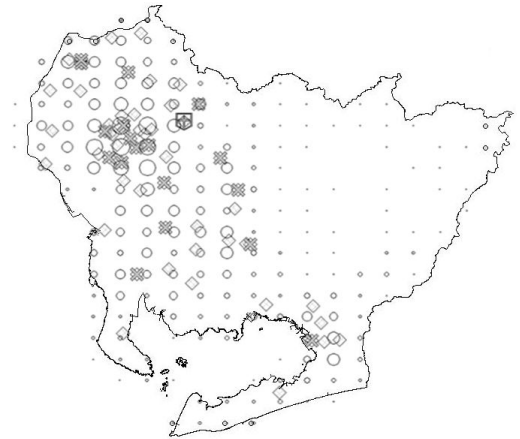


図 3 ドクターヘリによる主な搬送先病院と需要量

ドクターヘリの配備病院を考える際、病院の規模を考慮し、愛知医科大学病院の有するドクターヘリの主な搬送先病院となっている病院 22 棟を候補点とした.

6 カーラーの救命曲線

死亡率の最小化を考えていく上で、カーラーの救命曲線に基づいて死亡率を計算してする. カーラーの救命曲線とは、心臓停止、呼吸停止、大量出血の経過時間と死亡率の目安をグラフに示したものである. 図 6 を見ると、早急な治療開始がいかに大切かがよくわかる. 古田・田中 (2) の論文同様に治療開始までの時間を t とし、死亡率を t の関数としてカーラーの救命曲線を元に

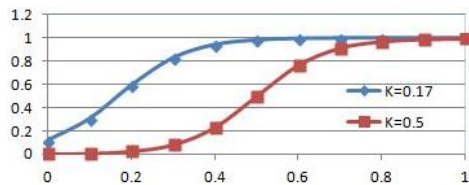


図 4 カーラーの救命曲線死亡率の関数を

$$f(t) = \frac{1}{1 + \exp[-12 * (t - K)]} \quad (23)$$

と設定する.

7 IBM ILOG CPLEX での計算結果

	K=0.17	K=0.5
導入前	0.255055673	0.010570246
RP 配置モデル	0.010570246	0.00676559
同時配置モデル	0.232647976	0.006619727
追加配置モデル	1746770.071	0.008229704

表 1 死亡率 ($p=10$ 固定)

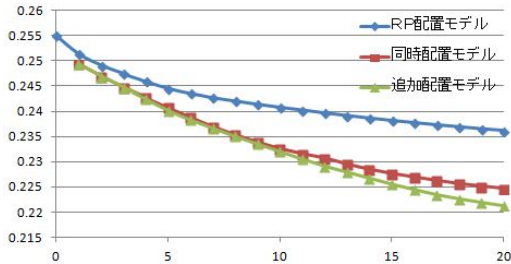


図 5 死亡率 (K=0.17)

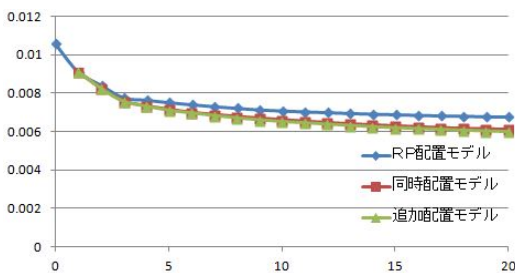


図 6 死亡率 (K=0.17)

ドクターヘリシステムを導入前の平均死亡率は、 $K = 0:17$ のとき $0:255055$ 、 $k = 0:5$ のとき $0:010570$ だったので、導入後は、どのモデルを使っても改善されていることがわかる。RP 配置モデルより、整備する RP の個数によって異なるが、現在の愛知県の平均死亡率を求めることができる。愛知医科大学病院にドクターヘリを配備してドクターヘリを運用する場合、 $K = 0:17$; $K = 0:5$ の結果から RP は、人口が密集している地域や病院が少ない地域に多く必要であることがわかる。また、同時配置モデルより、現在、1 機のドクターヘリを配備している愛知県のドクターヘリシステムと同じ条件で最も効率的に運用するには、刈谷豊田総合病院に配置するべきとわかる。3 つのモデルの平均死亡率を比較することで、現在の愛知県のドクターヘリシステムの平均死亡率をより改善する方法が分かる。ここで、 $K = 0:5$ の場合の 3 つのモデルの平均死亡率を比較するとどのモデルの結果も平均死亡率はあまり変わらないので、より平均死亡率を低くするには、 $K = 0:17$ の場合の結果を基準に RP の配置やドクターヘリを配備する場病院を求めるべきだと考える。また、3 つのモデルの結果より、現在の愛知県のドクターヘリシステムの平均死亡率をより改善するには、追加配置モデルを用いることが必要になる。追加配

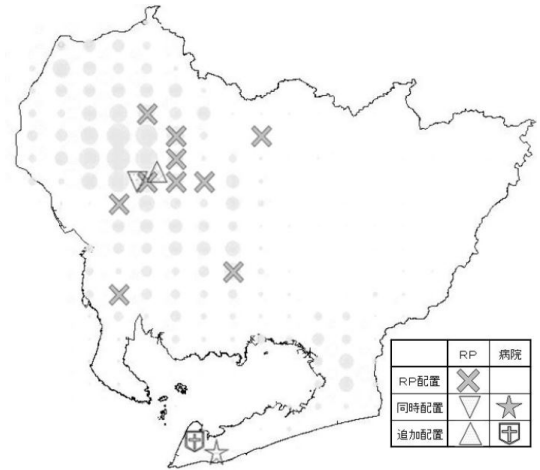


図 7 結果

置モデルの結果から、愛知医科大学の他に、安城更生病院にドクターヘリを配備する必要があることがわかる。しかし、ドクターヘリを運用するには多額の費用がかかるため、平均死亡率が約 2.2 % 下がるが、ドクターヘリを 2 機配備することは難しいと思われる。よって、3 つのモデルの平均死亡率が次に低い同時配置モデルを用いることが必要になる。18 同時配置モデルの結果から、配備するドクターヘリを現在の愛知医科大学病院から、刈谷豊田総合病院に移動させることを提案する。刈谷豊田総合病院に配備することで、愛知県の平均死亡率は、現在のドクターヘリシステムより約 1.9 % 下がり、ドクターヘリを 2 機配備するより費用が安くなることを考えられる。

参考文献

- [1] 愛知医科大学 H P : <http://www.aichi-med-u.ac.jp/hospital/sh01/sh0105,vol46,No3,P823-828>
- [2] 古田壮宏・田中健一 (2011) : ドクターヘリシステムのための平均救命率最大化型最適配置モデル, 都市計画論文集
- [3] 救急ヘリ病院ネットワーク HEM-NET : <http://www.hemnet.jp/where/>
- [4] 総務省消防庁 H P 第十五条 : <http://www.fdma.go.jp/concern/law/kokuji/hen51/5101000070.htm>