

出動基準や孤立地域がヘリコプターを利用した救急搬送システムの 最適配置計画に与える影響の分析

古田 壮宏
東京理科大学

田中 健一
電気通信大学

(受理 2010 年 9 月 15 日; 再受理 2011 年 6 月 3 日)

和文概要 本稿では、消防防災ヘリコプターの救急利用に注目が集まっている現状に対し、ヘリコプターの出動拠点とヘリポートの配置に着目して、出動基準の違いや孤立地域の存在が最適配置にどのような影響を与えるかを分析する。出動基準の違いに関する分析では2つの時間に着目する。1つめは、ヘリコプターを利用する場合の需要点から病院までの搬送時間である。この時間が一定以内である場合にヘリコプターによる搬送の対象とみなす。2つめは、救急自動車による直接搬送と比較して、ある一定時間以上の搬送時間の改善が見込める場合のみヘリコプターによる搬送を行うとときの改善時間である。本稿では、この搬送時間や改善時間および配置施設数の変化が最適配置に与える影響の分析を行う。また、高度医療サービスから孤立している地域の存在が最適配置にどのような影響を与えるかを、救急自動車による移動が不可能な地域を考慮して得られる解を用いて分析する。

キーワード: 施設計画, 施設配置問題, 消防防災ヘリコプター, 救急システム, 最大被覆問題

1. はじめに

近年、救急自動車の現場到着時間の増加や医師不足などの影響から、高速で遠隔地まで傷病者を搬送することができる消防防災ヘリコプター（以下、ヘリコプター）を利用した救急業務に注目が集まっている。ヘリコプターの出動件数の約半数を救急出動が占めており、平成20年度中における救急出動件数 [10] は、前年比 3.4% 増の 3,276 件となっており、救急業務にヘリコプターの利用が認められた平成 10 年以来、10 年連続で増加している。加えて、消防白書 [10] では「救急業務体制の整備の課題」のなかで、「特に、離島、山間部等からの救急患者の搬送や交通事故等による重症患者の救命救急センター等への救急搬送、さらには、大規模災害時における広域的な救急搬送等に大きな効果を発揮している。地域社会の安心・安全を確保する上で大きな期待が寄せられていることから、今後とも医療機関等との連携を強化しながら、消防防災ヘリコプターの機動力を活かした救急活動を推進することが求められている。」としている。このように、緊急度の高い救急呼び出しや高度医療施設の遠い地域の救急呼び出しに対応するために、ヘリコプターを利用することは有効であるとされており、そのさらなる整備が求められている。

このようなヘリコプターを利用した救急搬送を考える上で重要な点として、救急呼び出しの発生場所は、必ずしもヘリコプターの離着陸に適した場所であるとは限らないことである。そのため、ヘリコプターを利用した救急搬送では、救急自動車による救急現場（以降、需要点）からヘリコプターの離着陸可能な場所（以降、ヘリポート）までの搬送に加え、そのヘリポートでのヘリコプターとの待ち合わせののちに、そのヘリコプターによる病院への

搬送が行われている．このため，ヘリコプターを利用した効率的な救急搬送システムを構築するためには，需要点から傷病者を搬送する救急自動車とヘリコプターの両方がヘリポートに到着しなければ，病院に向かうことができないという構造を考慮する必要がある．従って，ヘリコプターの待機場所（以下，出動拠点）と同時にヘリポートの場所を検討することが重要となる．

このような状況に対し，古田・田中 [5] は，正方領域の仮想的な都市の下で，ヘリポートや出動拠点の配置が各需要点から病院までの搬送時間に与える影響の分析を行っている．さらに，このような救急自動車とヘリコプターの関係を考慮したヘリポートと出動拠点の最大被覆型同時配置モデルを提案している．ここで最大被覆型とは，施設から所与の時間（距離）内にある需要点の数が最大となるように施設を配置する問題 [3] を表している．これまでに，最大被覆型の問題を用いた救急自動車の最適配置に関する多くの研究が行われている [1, 4]．古田らは，ヘリコプター救急システムの設計のために，最大被覆型の観点から， T 時間以内に病院まで到着できる需要点の数を最大にする p 個のヘリポートと q 個の出動拠点を同時に求めている．

しかしながら，古田らの提案モデルによる最適配置の分析は，正方領域に需要点と配置候補点が一様に分布する極めて限定的な状況にとどまっている．ヘリコプターの効率的な運用をより現実的に考えるためには，様々な状況下での最適配置およびその需要点への影響を分析することが必要不可欠であると考えられる．

総務省消防庁では，平成 12 年にヘリコプターの出動基準ガイドライン [8] を示しているが，平成 21 年には，消防防災ヘリコプターの効果的な活用に関する検討会において，新たな出動基準 [9] が提案されている．このような出動基準の変更はシステム全体に大きな影響を与えることが予想される．特に，ヘリコプターの未配備地域の存在やヘリポートの未整備など [10] といった現状を鑑みると，都市基盤の整備という側面からこれらの配置分析を行うことには大きな意義があると考えられる．

また都市計画の分野では，その領域内の 2 点間距離の分布 [6] や交通網の敷設過程 [11] を対象に，都市形状がそれらに与える影響の分析が行われている．ヘリコプターを利用した救急搬送には，救急自動車とヘリコプターという 2 つの移動体に加え，さらにその待ち合わせを考慮する必要があるため，非常に特徴的な構造が存在している．このような構造を持つ救急搬送に関する分析は行われておらず，本稿で行う都市形状が与える影響の分析は大きな意義があると考えられる．

そこで，本稿では，古田らのモデルを用いて，出動基準と都市の形状，特にヘリコプターの活躍が期待される高度医療サービスからの孤立地域が，ヘリポートと出動拠点の最適配置と需要点に与える影響を明らかにすることを目的とする．ヘリコプターによる主な搬送先である救命救急センターは，各都道府県に非常に限られた数しかないのが現状である（平均：4.9，中央値 3，2010 年 10 月 1 日現在 [7]）．特に，都市部である東京都（24 施設）や愛知県（15 施設）および大阪府（14 施設）などに多く整備されている一方で，1 施設のみ（3 県）や 2 施設の県（10 県）も多い．都市部と比較し病院数が少ないこれらの地域では，搬送先が限定されるため，ヘリコプターを利用した救急搬送の運用形態が搬送時間に与える影響は大きい．この影響を分かり易く分析するために，本稿では病院数が 1 つの例を取り上げる．

なお，本稿におけるヘリポートの整備とは，単に学校のグラウンド等の一定のスペースがある場所を救急自動車とヘリコプターの待ち合わせ場所の候補として指定することではな

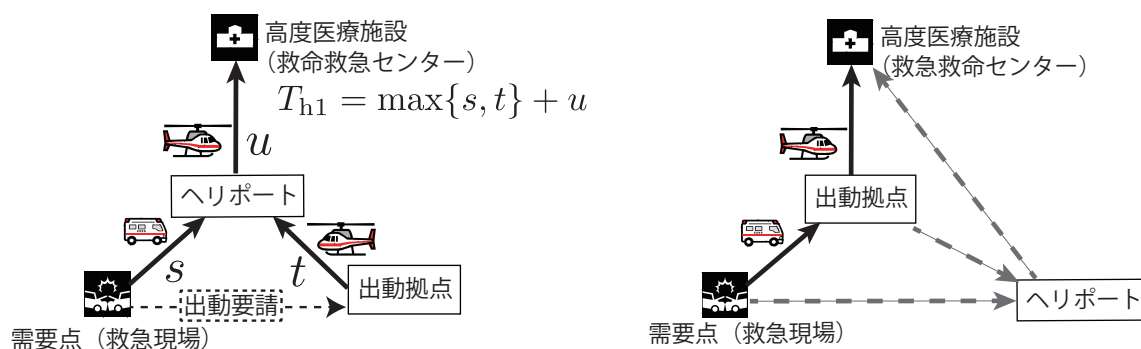


図 1: ヘリポートを利用したヘリコプターによる救急搬送
 図 2: ヘリポートを利用せずに出動拠点を利用する場合

く、ヘリコプターの離着陸用に以下のような条件を満たすように一定の費用を必要とするような整備を行うことを指すものとする。

- 高い障害物等が無い
- 地面がコンクリート等で整備されていること
- 早朝や夕方に対応するために照明施設が利用可能である。

2. 最大被覆型同時配置モデル

出動基準の違いや孤立地域の存在が最適配置および各需要点の搬送時間にどのような影響を与えるかを見るために、本節ではまず、古田ら [5] の提案したヘリポートと出動拠点の最大被覆型同時配置モデル (Maximum Covering Location Problem for EMS-Helicopter System, 以降 MCLP-ES) について述べる。彼らの研究においては、

- 需要点は離散的に与えられる
- 救急車の移動はユークリッド距離で与えられる
- 出動拠点とヘリコプターは 1 対 1 で対応する (例えば出動拠点を新たに配置する場合にはヘリコプターを新たに配置することを意味する)
- 救急車とヘリコプターは常に利用できる
- ヘリコプターは、需要点に到着した救急隊からの応援要請に対応して出動する [12]
- 単一の高度医療施設 (以下、病院) に搬送する
- ヘリコプターは直接需要点に降りることができない

という仮定の下で、図 1 のように救急自動車とヘリコプターのヘリポートでの待ち合わせを経た上での病院への搬送を考えている。なお、古田ら [5] におけるヘリコプターの利用は、ヘリポートを利用する場合のみを対象としている。しかしながら、ヘリコプターの待機している出動拠点が救急現場に近い場合には、そちらに直接、救急自動車により患者を搬送し、そこからヘリコプターによる搬送を行う方が自然であると考えられる (図 2)。本稿では、ヘリコプターを利用する場合において、ヘリコプターの出動拠点に患者を搬送し、そこから病院に搬送する場合も考慮する。

ここで、ヘリポートにおける救急自動車とヘリコプターの待ち合わせを考慮した病院への搬送時間について述べる。ある需要点からあるヘリポートへの救急自動車による移動時間を s 、ある出動拠点からそのヘリポートへのヘリコプターによる移動時間を t とし、そのヘ

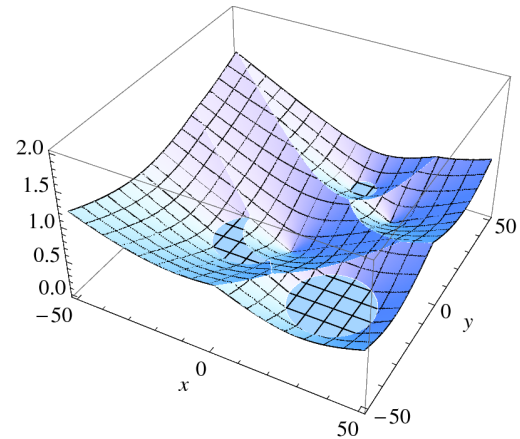
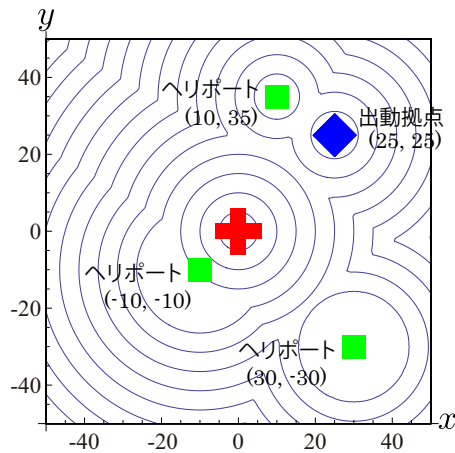


図 3: 各需要点からの移動時間の等高線図 図 4: 各需要点からの移動時間の概形

リポートから病院へのヘリコプターによる移動時間 u とするとき、ヘリコプターによる救急搬送をヘリポートを利用して行う場合の総移動時間 T_{h1} は、 $T_{h1} = \max\{s, t\} + u$ と表すことができる(図 1)。また、出動拠点から患者をヘリコプターによって搬送する総搬送時間 T_{h2} は需要点から出動拠点までの救急車による搬送時間と出動拠点から病院までのヘリコプターによる搬送時間との和として求めることができる。

古田ら [5] は、病院までのヘリコプターによる移動時間が基準値 T 以下のとき ($T_h \leq T$)、その需要点はヘリコプターによる搬送を受けられるとしている。しかしながら、直接救急自動車でも病院に向かう方が、病院に早く到達できる場合、ヘリコプターを利用しない方が自然である。そこで、本稿では、需要点から病院までの救急自動車による移動時間を T_a とし、 $T_{h1} \leq T$ かつ $T_a - T_{h1} > 0$ のとき、もしくは、 $T_{h2} \leq T$ かつ $T_a - T_{h2} > 0$ のとき、ヘリコプターによる搬送を受けられるものとする。

図 3, 4 は、ヘリポートと出動拠点を所与としたとき、各需要点において、より早い移動手段を用いたときの病院までの移動時間 ($\min\{T_a, T_{h1}, T_{h2}\}$) の等高線図と概形を表している。図中では、1 辺を 100 km とする正方領域を対象地域とし、救急自動車の速度を 50 km/h、ヘリコプターの速度を 200 km/h とした。病院までの移動時間が等しい需要点が存在する円状の領域が現れており、これらの需要点は、ヘリポートでヘリコプターが到着するのを待つ需要点を表している。ヘリコプターを利用した救急搬送は、このように非常に特徴的で複雑な移動時間を持つものであり、本稿で行う分析は、その特徴を理解する上で有用な示唆を与えたと考える。

次に、MCLP-ES の整数計画問題としての定式化 [5] を示すために、以下の記号を用いる。

入力・パラメータ

D : 需要点の添字集合

H : ヘリポートの配置候補点の添字集合

S : 出動拠点の配置候補点の添字集合

p : ヘリポートの数

q : 出動拠点の数

w_i : 需要点 i の需要量

$$a_{ijk} : \begin{cases} 1, & \text{需要点 } i \text{ がヘリポート } j \text{ で出動拠点 } k \text{ のヘリコプターを利用して } T \text{ 時間以内に} \\ & \text{病院に到着することができ, なおかつ, 救急自動車直接搬送するよりも} \\ & \text{早い場合 (} (T_{h1} \leq T) \wedge (T_a - T_{h1} \geq 0) \text{)} \\ 0, & \text{そうでない場合} \end{cases}$$

決定変数

x_j : ヘリポートを $j \in H$ に配置する場合 1, しない場合 0

y_k : 出動拠点を $k \in S$ に配置する場合 1, しない場合 0

z_i : 需要点 $i \in D$ から病院に T 時間以内に到着できる場合 1, できない場合 0

u_{jk} : ヘリポート $j \in H$ に配置し, かつ, 出動拠点 $k \in S$ に配置する場合 1, しない場合 0

以上より, MCLP-ES は次のように定式化される:

MCLP-ES の定式化

$$\max. \sum_{i \in D} w_i z_i, \tag{2.1}$$

$$\text{s. t. } u_{jk} \leq x_j, \quad j \in H, k \in S, \tag{2.2}$$

$$u_{jk} \leq y_k, \quad j \in H, k \in S, \tag{2.3}$$

$$z_i \leq \sum_{j \in H} \sum_{k \in S} a_{ijk} u_{jk}, \quad i \in D, \tag{2.4}$$

$$\sum_{j \in H} x_j = p, \tag{2.5}$$

$$\sum_{k \in S} y_k = q, \tag{2.6}$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad j \in H, \tag{2.7}$$

$$y_k \in \{0, 1\}, \quad k \in S, \tag{2.8}$$

$$z_i \in \{0, 1\}, \quad i \in D, \tag{2.9}$$

$$u_{jk} \in \{0, 1\}, \quad j \in H, k \in S. \tag{2.10}$$

目的関数 (2.1) は, ヘリコプターを利用して T 時間以内に病院に到着できる総需要量を表しており, これを最大化することが目的である. 式 (2.2) と式 (2.3) により, ヘリポート j と出動拠点 k の両方が配置された場合のみ, それらの組合せが利用可能であることを表している. 式 (2.4) は, 需要点 i がヘリコプターにより病院まで T 時間以内に搬送されるための条件である. 需要点 i から T 時間以内にヘリコプターを利用して病院に到着するためには, ヘリポートと出動拠点がそのような条件を満たすように配置されている必要がある. 式 (2.4) は, そのような組合せのヘリポート j と出動拠点 k が存在する場合のみ z_i は 1 の値を取ることができることを規定している. 式 (2.5) と式 (2.6) は, ヘリポートと出動拠点をそれぞれ p 個, q 個配置することを規定している. 式 (2.7), (2.8), (2.9), (2.10) は, 標準的な 0-1 整数制約である.

古田らは, このモデルを提案するとともに, 需要点と配置候補点が格子状に規則正しく与えられた正方領域のみを対象とし, ある 1 つの T の値の下で, 複数の p, q に対して MCLP-ES の解を求めている. 本稿では, より現実的な状況設定として, 出動基準と孤立地域を考

慮し、これらが最適配置にどのような影響を与えるかを分析する。

なお、需要点から傷病者を救急自動車により直接出動拠点に搬送し、そこからヘリコプターで搬送する形態を同時に扱う問題を定式化するために、以下のパラメータを追加する。

$$b_{ik} : \begin{cases} 1, & \text{需要点 } i \text{ が出動拠点 } k \text{ に行き, ヘリコプターを利用して } T \text{ 時間以内に病院に} \\ & \text{到着することができ, なおかつ, 救急自動車でも直接搬送するよりも早い場合} \\ & ((T_{h2} \leq T) \wedge (T_a - T_{h2} \geq 0)) \\ 0, & \text{そうでない場合} \end{cases}$$

このパラメータを利用し、式 (2.4) の代わりに、次式 (2.11) を利用することで定式化できる:

$$z_i \leq \sum_{j \in H} \sum_{k \in S} a_{ijk} u_{jk} + \sum_{k \in S} b_{ik} y_k, \quad i \in D. \quad (2.11)$$

これはヘリコプターによる2種類の搬送方法のいずれかを利用できれば、その需要点はヘリコプターによる搬送を受けられることを表している。以降では、この定式化を用いて議論する。

3. 出動範囲や出動基準の違いによる最適配置結果の分析

本節では、 T 時間以内に病院に到着できる需要点数を最大化するモデルを対象としている。出動基準の違いが最適解に与える影響を見るために、この T の違いによる最適解の変化を分析する。次に、ヘリコプターを利用したときの改善時間を考慮した出動基準による最適解の影響を分析する。ここでは、需要点と配置候補点が格子状に与えられた一辺 100 km の正方領域 (図 5) を対象として、中心にある病院に搬送する状況での分析を行った。需要点数を 2500 (50×50)、ヘリポートと出動拠点の配置候補点数をそれぞれ 64 (8×8) および 16 (4×4) とした。また、救急自動車の速度とヘリコプターの速度をそれぞれ 50 km/h、200 km/h とした。なお、本稿では、地理的影響に着目した分析を行うために、各需要点の需要量を 1 とした。また、最適解は、Core i7 2.93 GHz、8 GB RAM の計算機を使用し、CPLEX 12.2 を用いて算出した。計算時間の平均は 224.80 秒であった。

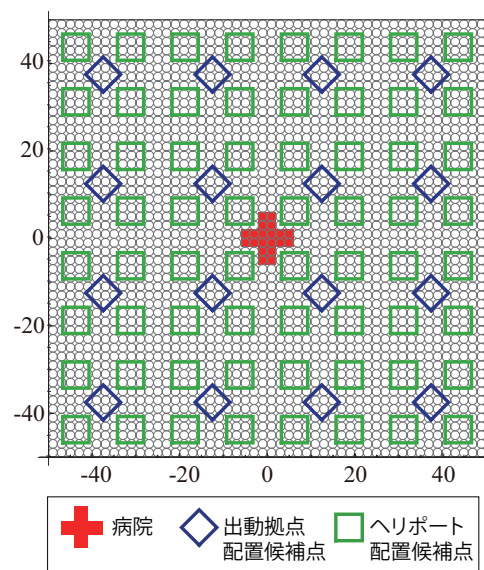


図 5: 対象領域と配置候補点

3.1. 出動範囲の違いが最適配置に与える影響の分析

救急救命活動において、ある基準となる時間以内に救急サービスを提供することは、その傷病者にとって重要な意味を持つ。また、効率的なシステムを構築する上で、どのような対象にサービスを提供するかを考えることは重要である。そこで、本節では、 T 時間以内に病院に搬送できる需要点数を最大化する MCLP-ES において、出動範囲を表す T に着目し、この変化が最適配置および各需要点にどのような影響を与えるかを確認する。なお、ここでいう出動範囲は、これから構築するヘリコプターを利用した救急搬送の主たる対象者を規定するものである。

表 1 は、 T を 0.40, 0.50, 0.60 時間と変化させたときに病院までその時間以内に到着できる需要点数を表している。なお、この値は救急自動車による病院までの平均搬送時間が 35 分である [10] ことを踏まえ、これと同等程度の時間で病院への搬送を実現するという目的で設定した。また、各需要点の需要量を 1 としているため、「ヘリコプター」の列の数は MCLP-ES の目的関数値を表しており、「救急自動車」の列の数はヘリコプターを利用するよりも早く救急自動車で T 時間以内に到着できる需要点数を表している。図 6 は、それぞれの場合におけるヘリポートと出動拠点の最適配置およびそのときにヘリコプターによる搬送を受けられる需要点（黒の円）を表している。なお、救急自動車により T 時間以内に搬送できる需要点をグレーの円で表している。 T を大きくすると、各ヘリポートの周りの病院に到着できる需要点の存在する範囲が広がる。ここで、 T 時間以内に病院に到達できる人数の最大化という観点から、システムの評価を行っているため、ある需要点に対して、 T 時間以内に到着できるヘリポートが複数存在する場合でも 1 つの場合と同様であることに注意されたい。このため、 $p = 3, q = 1$ における $T = 0.50, 0.60$ のように T の値を大きくするとそれに伴いヘリポート同士が離れ、同一需要点を重複してカバーすることを避けている。さらに、病院に近い需要点においては、直接救急自動車で行く方が良い状況が確認できる。一方で、2 つの出動拠点を配置する際には、より病院から遠い場所にヘリポートを配置しても十分に多くの需要点に T 時間以内の救急搬送を提供できることから、遠近両方にヘリポートを配置することで広範な需要点を対象としていることがわかる。また、 $p = 6, q = 2$ における $T = 0.50, 0.60$ のように外側にも出動拠点が配置される結果となっている。出動拠点が 1 つの場合には、その出動拠点を直接利用する需要点のみでなく、すべてのヘリポートにとって有効な場所に配置する必要があったが、2 つの場合には、組合せで利用するヘリポートが限定されるためであると考えられる。このように、出動拠点がヘリコプターを利用して何分以内に病院に搬送できることを目標とするかによって、整備すべき施設の場所が大きく異なっている。

表 1: T 時間以内に病院に到着できる需要点数 (= 需要量): 出動範囲の違い

p	q	T	ヘリコプター	救急自動車	計
3	1	0.4	542	188	730
3	1	0.5	850	254	1,104
3	1	0.6	1,227	258	1,485
6	2	0.4	928	74	1,002
6	2	0.5	1,425	209	1,634
6	2	0.6	1,944	426	2,370

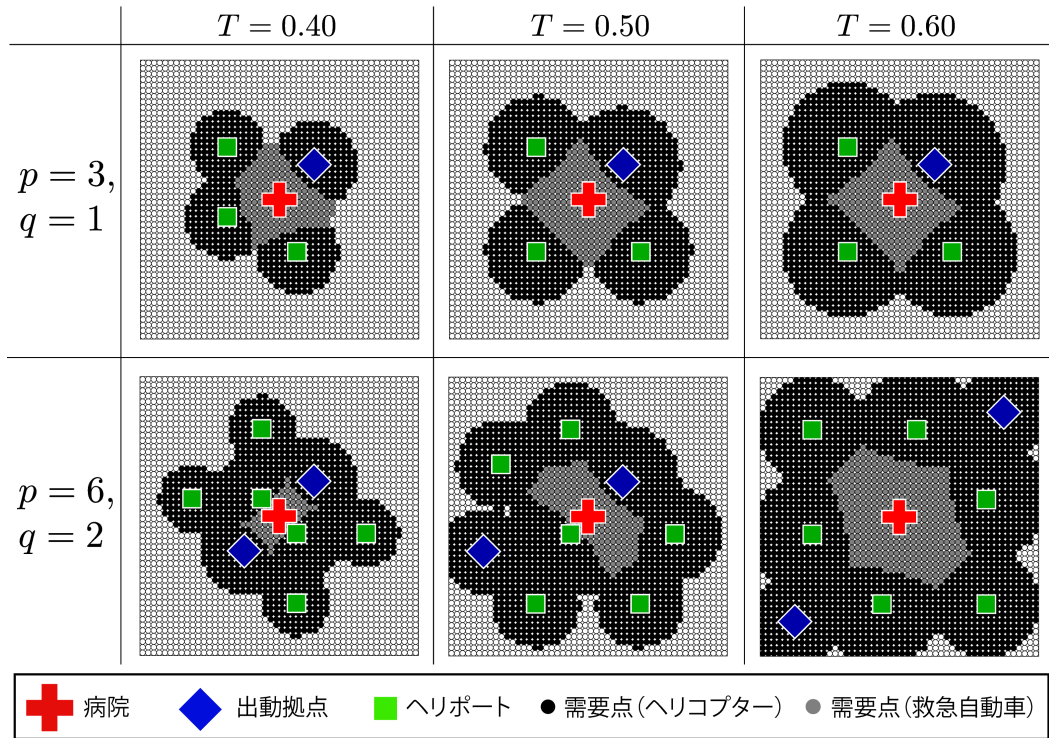


図 6: T の違いによる最適配置の違い

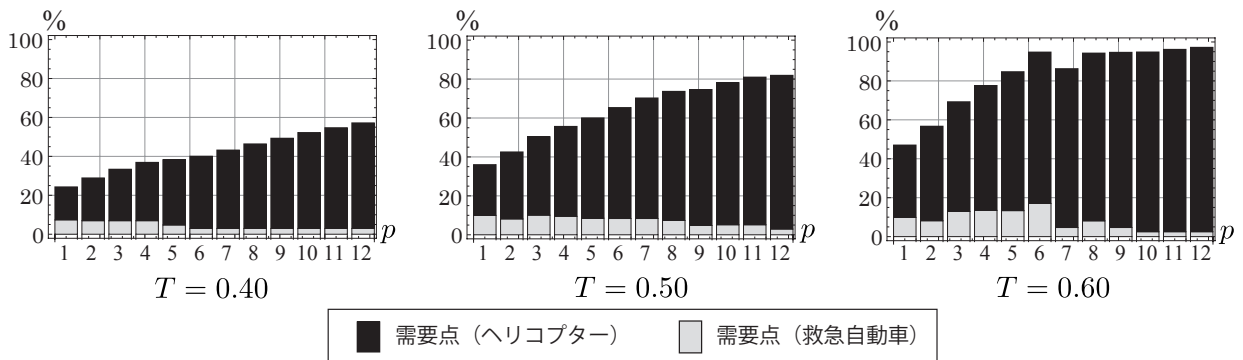


図 7: ヘリポート数 p に対する T 時間以内に病院に搬送できる需要点数の推移 ($q = 2, T = 0.40, 0.50, 0.60$)

図 7 は、出動拠点数を 2 としたときのヘリコプターと救急自動車それぞれの搬送手段により T 時間以内に病院に搬送できる需要点数である。各ヘリポート数 p のときに、それぞれいくつの需要点をヘリコプターもしくは救急自動車により T 時間以内に病院に搬送可能かを示している。なお、ヘリコプターにより T 時間以内に搬送できる需要点数は MCLP-ES の目的関数値そのものである。ある需要点がヘリコプターを利用するためには、ヘリコプターを利用した病院までの搬送時間が、 T 時間以内であることのみでなく、救急自動車による搬送時間よりも短縮されていなければならない。救急自動車により病院まで T 時間以内に搬送できる需要点、つまり病院に近い需要点をヘリコプターによりさらに改善することは難しい。1 つのヘリポートを配置することを考えるとき、病院の近くに配置するとその周囲の需要点はヘリコプターによる搬送の対象とならない。このため、ヘリポートの配置数が少ない場合には、病院より一定以上離れており、なおかつヘリコプターの導入により多くの需要点に T 時間以内の病院への搬送を提供できる配置候補点が選択されている。しかしながら、ヘリポート数が一定以上になると、そのような場所がなくなり、ヘリポートを配置したとしてもヘリコプターにより搬送される需要点が少ない場所にも配置しなければならなくなる。これにより、救急自動車により T 時間以内に搬送される需要点数はヘリポート数の増加に伴い減少していく結果となっている。

一部の大都市を除いた多くの都市において、ヘリコプターの数のみでなく救急自動車の数も限られたものであり、その中で効率的な救急搬送を実現する必要がある。このとき、ヘリコプターの出動範囲の設定の変更は、ヘリコプターを利用した搬送の対象となる需要点の範囲のみでなく、救急自動車による直接病院への搬送の対象となる需要点の範囲にも大きな影響を与えている。このように、搬送時には救急自動車も利用するため、互いの運用状況を考慮した上で、主なサービス対象を決定し、各施設の整備計画を考える必要がある。

3.2. 出動基準の違いが最適配置に与える影響の分析

先行研究 [5] や前節で示した結果は、ある T 時間以内に病院に到着できる需要点数の最大化によるものであった。これは、救急自動車の最適配置に関する研究 [1, 4] においてもよく利用されているものであるが、MCLP-ES では、 a_{ijk} をサービス利用者の定義に応じて適切に設定することで、これ以外にも様々な状況に対応した最適配置を検討することができる。

そこで、これを利用して、ヘリコプターの出動基準の違いが最適配置とヘリコプターを利用できる需要点にどのような影響を与えるかを分析する。総務省消防庁は、平成 12 年にヘリコプターを救急業務に利用する際の出動基準のガイドライン [8] を示している。このガイドラインでは、医療的な側面からの基準とともに、

- 救急自動車で搬送するよりもヘリコプターを利用する方が 0.5 時間以上の改善を見込まれること

という基準が示されている。一方で、平成 21 年に「消防防災ヘリコプターの効果的な活用に関する検討会」の報告書 [9] では、

- 時間短縮による効果があれば具体的な短縮時間にとらわれずに出動する

という基準が示されている。前節までに示した例は、後者の状況設定を表している。そこで、前者の状況設定を含めて、必要とする短縮時間 (δ) を変化させた場合、最適解にどのような影響を与えるかを分析する。このような分析を行うために、前節までの a_{ijk} における $T_a - T_{h1} \geq 0$ を $T_a - T_{h1} \geq \delta$ とする。また、同様に b_{ik} における $T_a - T_{h2} \geq 0$ を $T_a - T_{h2} \geq \delta$ とする。

短縮時間 δ の値を 0.17 (10 分)、0.33 (20 分)、0.50 (30 分) と変化させたときの最適配

置におけるヘリコプターによるサービスを受けられる需要点数を表したものが表 2 であり、そのときの配置結果が図 8 である。ここで、 T の値を 0.50 とし、 p, q は前節の図 6 と同様に設定した。 $\delta = 0.33$ のときは、0.33 時間以上の改善があり、なおかつ 0.50 時間以内に病院に到着できる需要点のみが対象となる。また、0.33 時間以上の改善が必要であるため、救急自動車で 0.33 時間以内に病院に到着できる需要点は、ヘリコプターによる搬送の対象とならない。図からもわかるとおり、対象となる需要点が非常に限定されるため、最適解においても、多くの需要点がヘリコプターによる搬送の対象となっていない。

表 2: δ 時間以上短縮できる場合にヘリコプターを利用する場合の T 時間以内に病院に搬送可能な需要点数 (= 需要量): 出動基準の違い

p	q	δ	ヘリコプター	救急自動車	計
3	1	0.17	610	484	1,094
3	1	0.33	437	484	921
3	1	0.50	254	484	738
6	2	0.17	1192	484	1,676
6	2	0.33	874	484	1,358
6	2	0.50	508	484	992

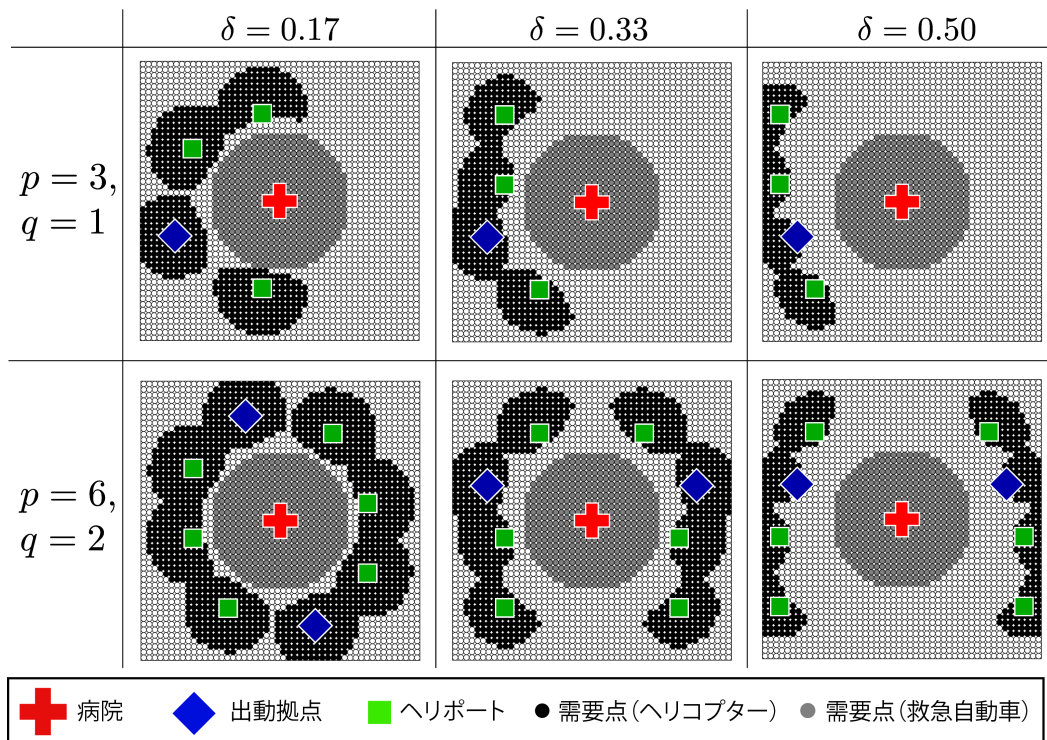


図 8: 各 δ の変更に対する最適配置結果 ($T = 0.50$)

図 9 は、図 7 と同様に T 時間以内にヘリコプターもしくは救急自動車によって病院に搬送可能な需要点数をヘリポート数ごとに示したものである。図 7 の状況と異なる点としては、 δ 時間以上の改善が必要であり、MCLP-ES におけるヘリコプター搬送の対象となる需要点が少ない点が挙げられる。このため、 δ の値が大きくなるにつれて、ヘリコプター搬送の需要点

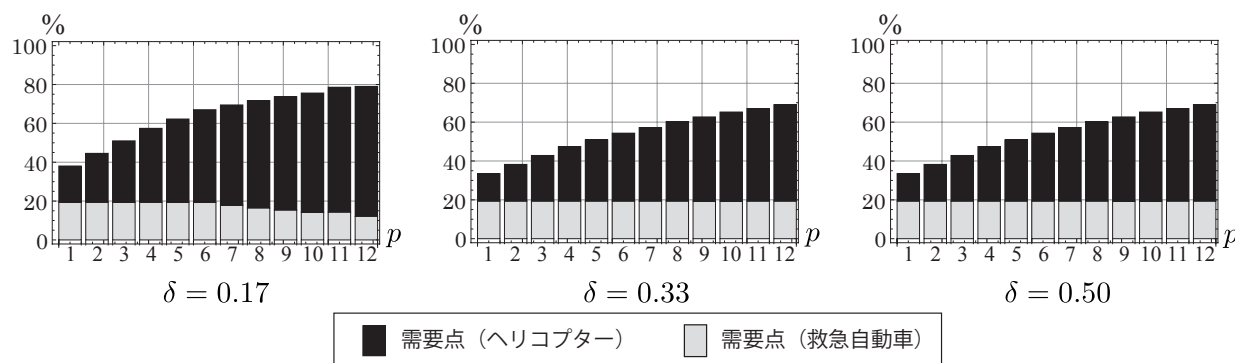


図 9: ヘリポート数 p に対する T 時間以内に病院に搬送できる需要点数 ($q = 2, \delta = 0.17, 0.33, 0.50$)

は減少している．さらに救急自動車により T 時間以内に病院に搬送できる需要点は， δ 時間以上の搬送時間の改善が起りにくくなっているため，ヘリコプター搬送の対象とはならなくなっている．結果として， $\delta = 0.00$ に相当する図 7 と比較し，救急自動車により T 時間以内に搬送できる需要点は増加している．

限られた予算の中で，救急自動車と併用してヘリコプターを運用することを考えるとき，よりコストのかかるヘリコプターの利用に対して，救急自動車による搬送からどの程度改善を見込めるかは重要な観点であると考えられる．どのような基準で出動するかを決定することは，主なサービスの対象をどのように設定するか（例えば，ヘリコプターを救急搬送の中核とするのか，それとも救急自動車の補完的役割とするのかなど）を意味しており，必然的に，必要とされるヘリポートと出動拠点の個数や最適配置が大きく異なる．これらのことを十分に考慮した上でヘリポートや出動拠点の整備計画を考えることが重要であろう．

4. 孤立地域の存在が最適配置に与える影響の分析

救急搬送におけるヘリコプターの利用には，傷病者を高速に高度医療施設に搬送することのみでなく，高度医療サービスから孤立している地域（以降，孤立地域と呼ぶ）に対応することも求められている [10]．ここでいう孤立地域の例としては，山間部の交通の便が極端に悪い場所や離島など，救急自動車による搬送が困難である地域を挙げることができる．本節では，このような状況が最適配置にどのような影響を与えるかを分析する．

図 10 は，対象とする地域と配置候補点を表している．ここでは，孤立化を単純化して表すために，救急自動車による各地域間の移動はできないものとする．結果として，孤立地域からはヘリコプターを利用しない限り，高度医療サービスを提供するような病院には到着できないことになる．また，この孤立地域の各要素を表すために以下の記号を用いる．

D' : 孤立地域の需要点の添字集合 ($D' \subseteq D, |D'| = 1250$)

H' : 孤立地域のヘリポートの配置候補点の添字集合 ($H' \subseteq H, |H'| = 32$)

S' : 孤立地域の出動拠点の配置候補点の添字集合 ($S' \subseteq S, |S'| = 8$)

図 11 は，上記の設定の下で $T = 0.50$ として，最適配置を求めた結果である．孤立地域にヘリポートを配置しても，病院から離れていることから，下側の地域と比較して，そのヘリポートを利用して病院に到着できる需要点が少ない．このため，孤立地域には，ヘリポートが配置されず，結果として，ヘリコプターを利用することができなくなっている．

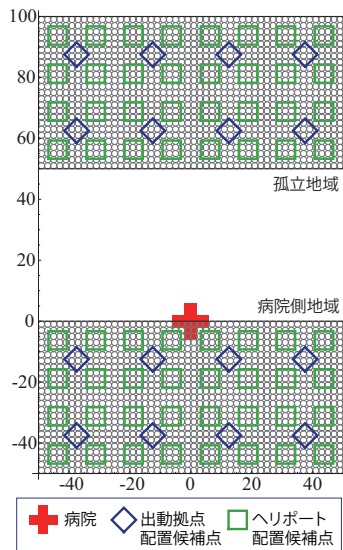


図 10: 対象領域と配置候補点

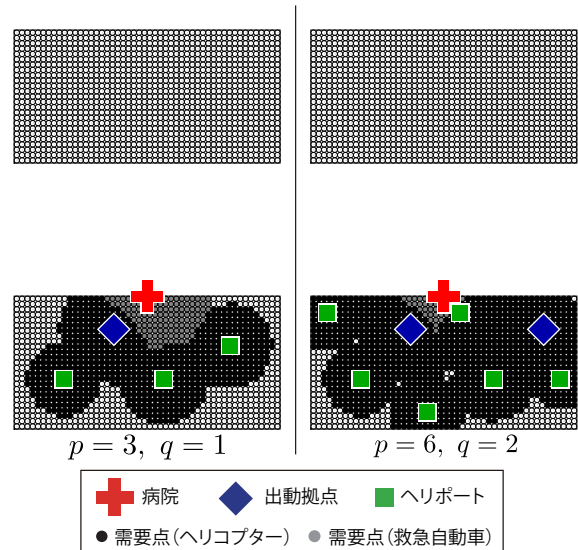


図 11: 孤立地域に対する最適配置結果

ある地域に対して、公共性の非常に高い高度医療サービスがまったく提供されないことは、改善されるべき状況である。このとき、孤立地域に対して、ヘリコプターによる救急搬送サービスを提供する場合として、以下の3種類の設定を考え、それぞれを実現する配置を求めるための制約条件を示す。

設定1： 出動範囲 (T) に着目すると、高度医療サービスへのアクセスの悪い孤立地域に対しては、そうでない地域よりも、大きい値を設定することも考えられる。そこで、病院側の需要点に対しては $T = 0.50$ とし、孤立地域の需要点に対してはそれよりも大きい $T = 0.75$ を設定する。これは、係数 a_{ijk} と b_{ik} を設定する際に、 T の値を病院側の地域と孤立地域とで異なる値を用いて設定することで実現できる。

設定2： 少なくとも1つのヘリポートもしくは出動拠点を配置することでヘリコプターによる搬送を可能にする。このとき、 T 時間以内に病院に到着できるかどうかは考慮しないが、高度医療サービスへのアクセスを提供するという意味で重要である。これを実現する制約条件は以下のように記述できる：

$$\sum_{j \in H'} x_j + \sum_{k \in S'} y_k \geq 1. \quad (4.1)$$

設定3： 少なくとも1つの需要点は T 時間以内にサービスを受けられることを可能にする。これは、単に高度医療サービスへのアクセスを提供するのみでなく、一定時間以内にそのサービスを提供するという点で、設定1よりも孤立地域に対してより良いサービスを提供するものとなる。これを実現する制約条件は以下のように記述できる：

$$\sum_{i \in D'} z_i \geq 1. \quad (4.2)$$

各設定を個別に適用し最適配置を求めた結果が表3および図12である。表中の「ヘリコプター」の列の「合計」の値が目的関数値を表している。まず、設定1では、図11とは異なり、孤立地域側でのヘリコプターによる搬送の対象となるための条件 T の値が大きくなっているため、孤立地域側にヘリポートや出動拠点が配置される結果となっている。これは、

表 3: 各設定における T 時間以内に病院に到着できる需要点数 (=需要量)

	ヘリコプター			救急自動車
	病院側地域	孤立地域	合計	病院側地域
設定 1 ($p = 3, q = 1$)	426	512	938	104
設定 1 ($p = 6, q = 2$)	691	902	1593	129
設定 2 ($p = 3, q = 1$)	568	0	568	129
設定 2 ($p = 6, q = 2$)	959	64	1023	40
設定 3 ($p = 3, q = 1$)	239	142	381	173
設定 3 ($p = 6, q = 2$)	959	64	1023	40

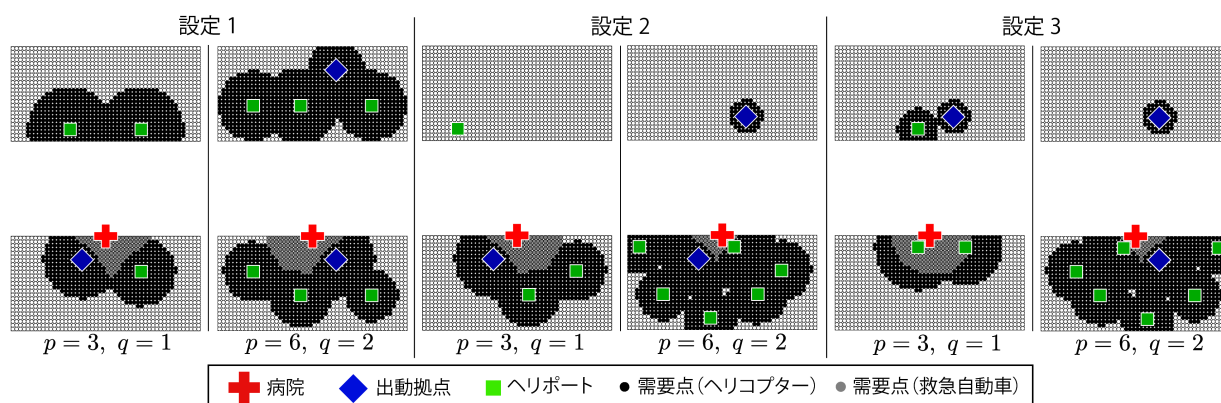


図 12: 制約条件の追加による最適配置の変化

救急システムの対象範囲や各地域間の距離などによっては、孤立地域側に設定 2 や設定 3 のような条件を与えなくても、最適解において孤立地域側に施設が配置される可能性を示している。しかしながら、搬送に要する時間は救命率や予後の状態に大きく影響し、一定時間以内に対応した処置を行うことに大きな意味がある [10]。このため、孤立地域と病院側地域とで同じ出動範囲で、孤立地域のことを考慮した最適配置を考えることにも意味がある。設定 2 や設定 3 は両地域において同じ出動範囲で孤立地域にもヘリコプターによる搬送を提供するためのものである。

設定 2 のみを適用した $p = 3, q = 1$ の場合においては、制約条件によりひとつのヘリポートを配置しているが、実際にはカバーされている需要点はなく、残りの 2 つのヘリポートと出動拠点によりできるだけ多くの需要点に対して T 時間以内のサービスの提供をおこなう配置を求めている。その一方で、 $p = 6, q = 2$ では、出動拠点を 2 つ配置できることから、そのうち 1 つを孤立地域に配置することで、孤立地域のヘリポートを有効に使う結果となっている。

次に、式 (4.2) のみを追加した設定 3 の場合の最適配置に注目する。設定 3 では、少なくとも 1 つの需要点が T 時間以内に病院に到着できる必要がある。この設定においては、出場拠点を孤立地域側に配置しなければ、病院に T 時間以内に搬送することはできないため、 $q = 1, 2$ のどちらの場合においても、出動拠点を孤立地域側に配置する結果となっている。その上で、 $q = 1$ の場合においては、1 つしかない出動拠点を孤立地域側に配置することから、より有効にヘリポートを利用するためにヘリポートのうちの 1 つを孤立地域側に配置す

る結果となっている。これは、この1つのヘリポートを病院側に配置したとしても、出動拠点が遠くそのヘリポートを利用して T 時間以内に病院に搬送できる需要点あまり存在しないためである。

近年、少数の高齢者のみが生活し交通の便の悪い地域に対する様々なケアが課題となっている。適切な医療サービスの提供も重要な課題のひとつであるが、すべての地域に一斉にヘリポートなどを整備することは現実的でない。そのような状況の下で、どの地域を優先して整備を行っていくかを検討するための基礎的な材料として、MCLP-ES を用いたこのような分析は有用であると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、消防防災ヘリコプターの救急利用に注目が集まっている現状に対し、ヘリコプターの出動拠点とヘリポートの配置に着目した分析を行った。ヘリコプターを利用する際には、救急自動車との連携が不可欠であり、複雑な構造を含んでいる。そのため、数理計画法を用いて最適な配置を求めることは、現実問題を考える上での有用な示唆を与えることができる。本稿では特に、出動基準の違いや孤立地域の存在が最適配置にどのような影響を与えるかの分析を行った。出動基準の違いとしては、ヘリコプターを利用した場合の需要点から病院までの搬送時間に着目した場合と、救急自動車による病院へ直接搬送した場合の搬送時間に対するヘリコプターを利用した場合の搬送時間の改善時間に着目した場合について、その搬送時間および改善時間や配置施設数を変化させたときの影響の分析を行った。また、高度医療サービスから孤立している地域の存在が最適配置にどのような影響を与えるかを、救急自動車による移動が不可能な地域を考慮して得られる解を用いた分析を行った。

今後の課題としては、まず、救急自動車の最適配置の研究 [2] で行われているような、より現実的かつ複雑な状況を想定したモデルの構築を挙げることができる。例えば、ある出動要請に対して、最寄りのヘリコプターが利用中であるという状況を想定するなどの様々な拡張モデルを考えることは有用であろう。

また、実際の都市形状や需要分布の下での詳細な分析などを挙げることができる。このとき、大規模なデータを利用して分析を行うことができるように、効率的な発見的解法の構築も必要であると考えている。

謝辞

本研究の一部は、平成 22～24 年度科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号 22710152; 研究代表者 古田壮宏) および平成 21～23 年度基盤研究 (B) (課題番号 21310098; 研究代表者 鈴木敦夫) の助成によるものである。また、本論文について貴重なご助言を頂いた 2 名の査読者の方に心より感謝致します。

参考文献

- [1] B. Adenso-Díaz and F. Rodriguez: A simple search heuristic for the MCLP: Application to the location of ambulance bases in a rural region. *Omega, International Journal of Management Science*, **25** (1997), 181–187.
- [2] L. Brotcornea, G. Laporte, and F. Semet: Ambulance location and relocation models. *European Journal of Operational Research*, **147** (2003), 451–463.

- [3] R. Church and C. ReVelle: The maximal covering location problem. *Papers in Regional Science*, **32** (1974), 101–108.
- [4] D.J. Eaton, M.S. Daskin, D. Simmons, B. Bulloch, and G. Jansma: Determining emergency medical service vehicle deployment in Austin, Texas. *Interfaces*, **15** (1985), 96–108.
- [5] 古田壮宏, 田中健一: 消防防災ヘリコプターの出場拠点とヘリポートの最大被覆型同時配置モデル. *都市計画論文集*, **44** (2009), 751–756.
- [6] 出水田智子, 腰塚武志: 地域内の通行不能領域がその周辺の移動に与える影響. *都市計画論文集*, **31** (1996), 37–42.
- [7] 日本救急医学会ホームページ: 全国救命救急センター一覧,
<http://www.jaam.jp/html/shisetsu/qq-center.htm> (平成 23 年 6 月 1 日現在).
- [8] 総務省消防庁: 救急ヘリコプターの出動基準ガイドライン. 消防救第 21 号 (2000).
- [9] 総務省消防庁: 消防防災ヘリコプターの効果的な活用に関する検討会報告書 (2009).
- [10] 総務省消防庁編: 平成 21 年版消防白書 (日経印刷, 2009).
- [11] T. Suzuki and Y. Watanabe: Growth and shape of transportation networks. *Forma*, **23** (2008), 59–71.
- [12] 東京消防庁ホームページ (東京消防庁航空隊): 航空隊の業務,
<http://www.tfd.metro.tokyo.jp/tfd/hp-koukuutai/gyoumu.html> (平成 23 年 6 月 1 日現在).

古田壮宏
東京理科大学
工学部経営工学科
〒162-8601 東京都神楽坂 1-3
E-mail: takef@fw.ipsj.or.jp

ABSTRACT**ANALYZING THE EFFECT OF DIFFERENT DISPATCHING RULES AND
EXISTENCE OF A GEOGRAPHICAL BARRIER ON OPTIMAL DESIGN
OF EMS-HELICOPTER SYSTEM**

Takehiro Furuta Ken-ichi Tanaka
Tokyo University of Science The University of Electro-Communications

We introduce a maximal covering model for EMS-Helicopter system in which helicopters are used to transfer patients in critical need of care to a hospital. Locations of both helipads and stations are determined so as to maximize demands accessible to helicopter transportation. We focus on two different dispatching rules on transportation time; one is the total time of transporting a patient to a hospital by helicopter and the other is the amount of time reduced by transporting a patient to a hospital by helicopter compared with transporting a patient directly to the hospital by ambulance. Two types of coverage objectives are introduced for these rules. The first type considers that a given demand is covered when the transportation time is within the given threshold while the second type considers that a given demand is covered when the amount of time reduction is short enough. Optimal locations of both helipads and stations are analyzed using an idealized city model for various values of coverage times. We also examine how the existence of a geographical barrier affects the optimal design of EMS-helicopter system.