

救急車の適正配備における台数と場所の効果について

稲川 敬介

本研究では、救急自動車の配備台数や配備場所を変更する場合のシミュレーション実験を行い、救急搬送システムにおける救急自動車の適切な配備について議論する。また、それぞれのシミュレーション実験結果を基に配備台数と配備場所の関係についての一考察を与えることにより、効率的なシステム構築の支援となることを目的とする。

キーワード：救命，シミュレーション，都市計画

1. はじめに

近年、高齢化社会の進展や住民意識の変化などの理由により救急搬送システムへの期待が高まっている。平成20年版消防白書[7]によると平成19年中の救急出場件数はおよそ529万件であり、これは国民26人に1人が救急搬送されたことになるという。

この現状を受けて、消防庁では法改正や体制の見直しなどさまざまな対応策に取り組んでいる。日本におけるプレホスピタル・ケア（救急現場および搬送途上における応急処置）の充実を図るため平成3年に制定された救急救命士法は、平成15年から引き続いた法改正により、それまで限定されていた応急処置の範囲を飛躍的に拡大した。これにより気管挿管や除細動などを含めた高度な応急処置が可能となった。平成18年に策定された「市町村の消防の広域化に関する基本指針」は、小規模な消防本部を統合することにより運用効率を向上させ、消防体制の基盤強化を図ることを目的としている。この計画では、消防署の配置および管轄区域の適正化や、総務部門や通信指令部門の統合による効率的な人員再配置などが盛り込まれている[7]。

このような状況を背景に、本研究では、救急搬送システム全体のうち、救急自動車（以後救急車とする）の運用体制に関する部分（以後救急車システムとする）について議論する。救急車システムの評価指標として現場到着までの所要時間（以後対応時間とする）

に注目し、救急車の配備に関するシミュレーション実験を行う。また、この実験から得られる考察により配備計画における基礎情報を与え、効率的な救急車システム構築の支援となることを目的とする。

一般に救急車システムは、さまざまな不確実性を伴う。例えば、救急車の呼出しはいつどこで起こるか分からない。また、消防署の近くの住民が救急車を呼出すとしても、最も近い救急車は既に出払っていて、遠い消防署から救急車がやってくるかもしれない。このように、救急車システムは不確実な状況の下で救急搬送を繰り返す。救急車システムを整数計画法として扱う研究の一部は Brotcorne ら[1]によってまとめられている。また、国内においては両角[6]等の研究がある。一方、確率モデルとして扱う研究は Larson[2]等によって提案されている。また、国内においては稲川ら[3]の研究において、連続時間型マルコフ連鎖を用いたモデル化が提案されている。特に稲川ら[4][5]の研究では、詳細な道路網を構築してメディアン問題やセンター問題など古典的な配置問題の解を救急車の配備として適用した結果を報告している。

本研究では、はじめに現状の分析を行い、シミュレーションモデルを構築する。このシミュレーションモデルでは、さまざまな指標を得ることができるが、プレホスピタル・ケアの重要性を考慮して平均対応時間（救急車が呼出しを受けてから現場に到着するまでの平均時間）の短縮に注目する。シミュレーションを用いて平均対応時間を求めることは、実際に配備計画を検討する消防署員等にとっても直感的でわかりやすく、結果に対する理解が得られやすいと考える。4節では、モデルを愛知県瀬戸市に適用し、いくつかのシミュレ

いなかわ けいすけ
秋田県立大学 システム科学技術学部
〒015-0055 由利本荘市土谷海老ノ口 84-4

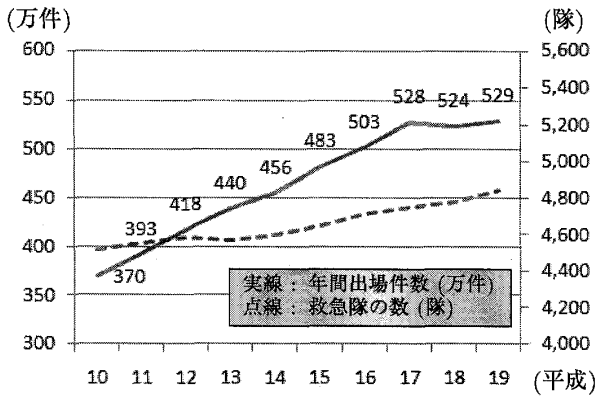


図1 年間出場件数と救急隊数の推移

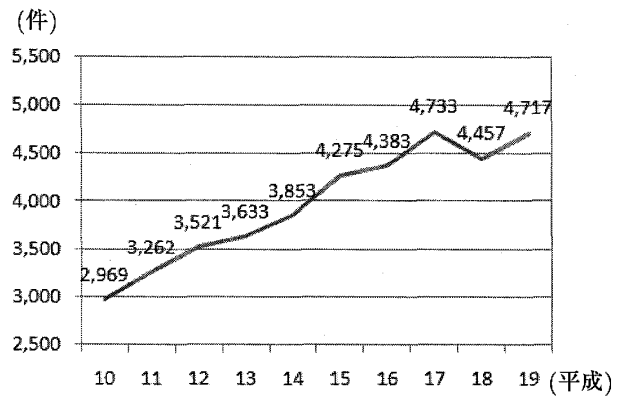


図3 瀬戸市における年間出場件数の推移

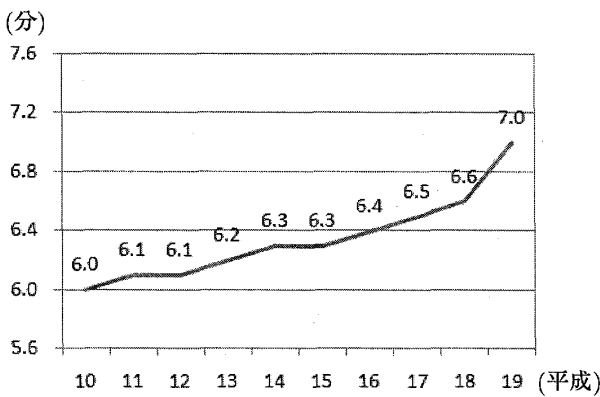


図2 全国における平均対応時間の推移

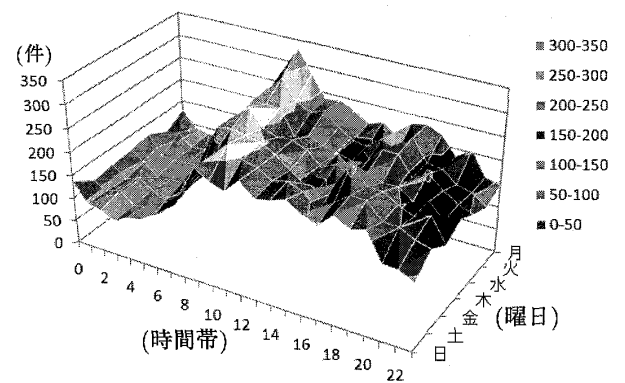


図4 曜日・時間帯別の出場件数

ーション実験を行う。この実験では救急車の配備台数の変更と配備場所の変更による救急車システムの変化について議論を行い、救急車の配備台数を増やす効果と配備場所を変更する効果の関係についての一考察を与える。

2. 現状の分析

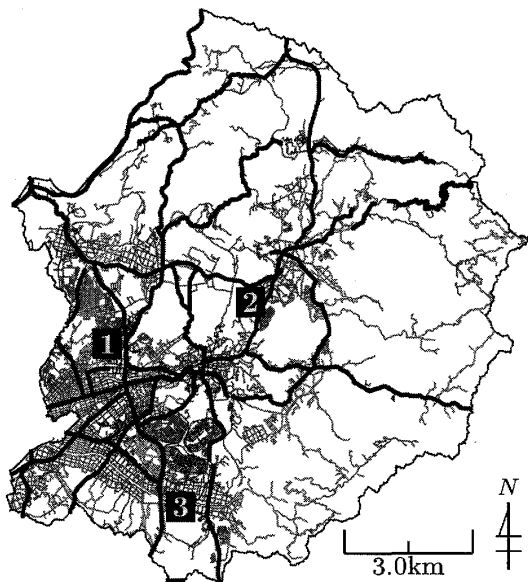
救急車の出場件数が全国的に増加傾向であることは周知のとおりである。図1は、平成10年から19年間の全国における年間出場件数の推移を示した図である。また、図中の点線は同時期における救急隊数を示す。この10年間の年間出場件数の増加率は1.43倍であるのに対し、救急隊数の増加率は1.07倍に留まっている。救急隊数の増加と比較して、年間出場件数が急激に増加している現状がわかる。

ただし、平成17年から19年にかけての年間出場件数はそれ以前の時期と比べて安定しているようにも見える。これらは地道な啓蒙活動や報道機関による惨状の報告などの効果があったと考えられるかもしれない。しかしながら、その一方で平均対応時間については年々増加の一途をたどっており、平成10年にはおよそ6.0分であったにもかかわらず19年には7.0分と

なっている(図2参照)。対応時間の遅延は救命率と密接な関係があると考えられているので、この状況は救急車システムにおいて致命的な問題である。

次に、愛知県瀬戸市についての紹介を行う。本研究では、瀬戸市消防本部より平成13年から19年までの7年間の救急データの提供を受けており、本研究ではこの救急データを基本情報としてシミュレーション実験を行う。瀬戸市は人口およそ13万人の中規模な市である。図3は、平成10年から19年間の同市における年間出場件数の推移を示す図である。図より、同市においても年間出場件数は全国と同様の傾向が存在する。この10年間の年間出場件数の増加率は1.60倍にもなるが、同市の救急車の配備台数は10年間同じである[8]。図4は、救急データの提供を受けた平成13年から19年の7年間の出場に関して、曜日・時間帯別に分類した図である。高さは各曜日、各時間帯における7年間の総出場件数を表す。これを見ると、同市で最も救急車の出場件数が多い曜日・時間

¹ ただし、平成17年に開催された愛知万博期間中は万博署が設置され、救急車1台が運用された。また、図3の年間出場件数においても万博署で対応した107件を含む。



1 本署, 2 東署, 3 南署

図5 瀬戸市の道路網と消防署の位置

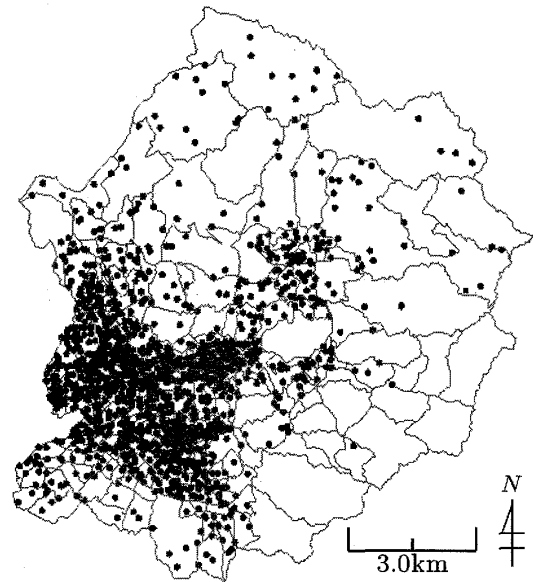


図6 各町丁目における出場件数のイメージ

帯は月曜日の9時台である。また、同市における出場件数には、深夜の時間帯に少なく、朝の9時前後に極端に多く、昼の時間帯には比較的安定しているという傾向があることがわかる。

現在、同市では4台の救急車が3箇所の消防署に配備されている。図5に、同市の主な道路網と各消防署の位置を示す。図中の四角は各消防署を表し、番号1, 2, 3はそれぞれ本署, 東署, 南署を表す。また、図中の太線は主要な幹線道路を表す。救急車の配備台数は、署1に2台, 署2と署3に各1台ずつである。市街地は南西部に集中しており、救急車の出場件数も多い。近年、南部に多くの住宅地が建設され、この付近の出場件数の増加は著しい。図6は、同市内の各町丁目における救急車の出場件数のイメージである。図中の点の1点は、各町丁目において7年間でおよそ20件の出場があったことを表す。この図をみると、救急車の出場が南西部に偏っている状況がわかる。

3. シミュレーションモデル

ここでは、シミュレーションモデルの概要について述べる。本研究では、図4の分析と同データにおけるクラスター分析の結果から、平成15年の昼間のみを分析対象とする。

救急車の呼出しは、各町丁目から人口に比例する強度を持つ指数分布にしたがって発生すると仮定する。救急データの分析結果より、市全体では84.43分に1件の頻度で呼出しが発生する。各町丁目の数は、利用

する数値地図2500に記載されている361町丁目とする(図6参照)。1件の呼出しに対しては、必ず1台の救急車に対応することを仮定する。1件の呼出しが救急車を占有する総時間をサービス時間と定義する。サービス時間は救急車の移動時間を考慮した強度を持つ指数分布にしたがうと仮定する。救急車の移動時間は、稲川ら[4]の移動時間推定手法を利用して、救急データと道路距離から救急車の移動時間を推定する。具体的なサービス時間の平均は、準備時間1.32分とそれぞれの署から町丁目の代表点までの移動時間とそれ以外にかかる時間の平均46.64分の和とする。すべての救急車に対応不可能である場合に発生した呼出しは無視されると仮定する。すなわち、このシミュレーションモデルは呼損モデルである。この仮定は、対象領域内のすべての救急車に対応不可能であるとき、あらかじめ協定を結んでいる近隣の自治体の救急車がこの呼出しに対応することを意味する。

各呼出しに対する対応時間は、準備時間とそれぞれの署から町丁目の代表地点までの移動時間の和とする。ただし、呼損である場合の対応時間は、呼損費用として9.40分を用いる。呼損費用は他市の救急車が瀬戸市内の呼出しに対応するときの平均時間を意味するが、提供を受けた救急データにはこの情報が含まれていないため、瀬戸市内から他市へ対応した場合の平均時間でこれを代用する。シミュレーション試行回数については、直感的に理解できるように配慮して、瀬戸市の100年分を想定する。具体的には、5,000件の呼出しへの対応を1回のシミュレーションとし、これを100

表1 シミュレーション実験の概要

実験1: 現在保有する設備のみを利用する場合
実験2: 新たに1箇所の消防署を建設可能な場合
実験3: 新たに1台の救急車を購入可能な場合
実験4: 新たに1箇所の消防署の建設と1台の救急車の購入が同時に可能な場合

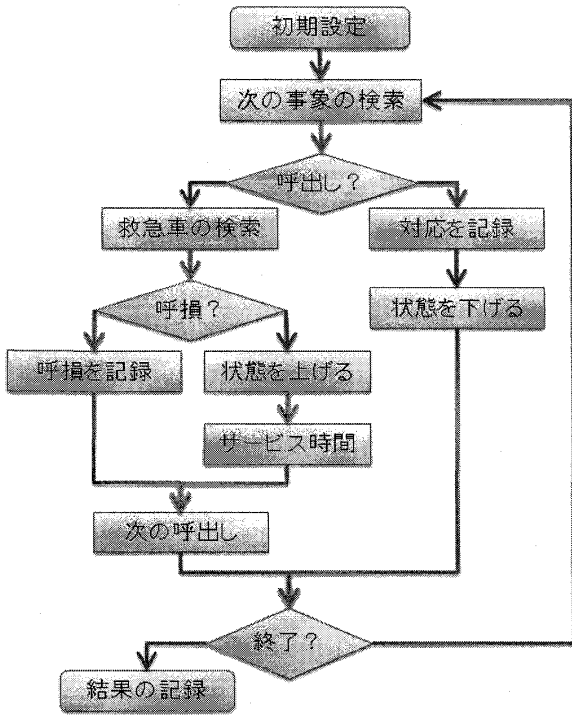


図7 シミュレーションモデルの概要

回繰り返すときに得られる平均をシミュレーション結果とする。

以上の仮定を基にしたシミュレーションモデルの流れの概要を図7に示す。図中の初期設定では、乱数を用いてすべての町丁目に救急車の呼出し時刻を設定する。次の事象の検索では、最も早い時刻を持つ事象の時刻までシミュレーション時間を進める。呼出しかどうかの判定では、検索した事象が救急車の呼出しであるのかサービスの終了であるのかを判定する。呼出しであれば、図中を左へ進む。救急車の検索では、サービス中でない救急車の中で最も近い救急車を選択する。ただし、すべての救急車がサービス中である場合は、次の呼損かどうかの判定で左へ進み、呼損が起きたことを記録する。呼損でない場合は、選択された救急車の状態を対応中とし、乱数によりサービス時間を設定する。次の呼出しでは、その町丁目の次の呼出し時刻を乱数により設定する。終了判定では、設定された終了条件(5,000件の対応)に当てはまらない場合は、次の事象の検索に戻る。検索された次の事象が呼出しでない場合はサービスの終了であるので、対応を記録して救急車をサービス可能な状態に解放する。この一連を終了判定が満たされるまで繰り返す。終了判定が満たされた後、対応や呼損の記録から対応時間や呼損率などの平均を計算する。

4. シミュレーション実験

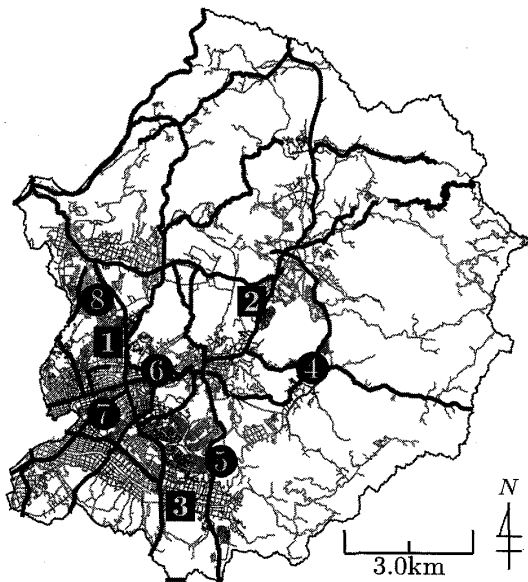
ここでは、前節のシミュレーションモデルを愛知県瀬戸市の救急車システムに適用したシミュレーション実験を行う。この実験では、主に4種類の状況を仮定して実験を行う。4種類の状況を表1にまとめる。ここで、消防署とは救急車が待機可能な施設とする。それぞれの状況における平均対応時間と呼損率をシミュレーションにて求め、これらと比較することにより救急車システムの効率性について議論する。また、実験1から4の結果を踏まえて救急車の配備台数に関するシミュレーション実験を行い、配備台数の変化による効果を確認する。

4.1 現状の確認

はじめに、現有設備のみを利用して救急車の配備を変更する場合、現状よりも適切な配備が存在しないかを確認する。この実験では、4台の救急車を3箇所の署に配備するすべての組合せについてシミュレーションを行い、現状の配備{1,1,2,3}と比較する。ここで配備{1,1,2,3}の表記は、1台目の救急車を署1、2台目を署1、3台目を署2、4台目を署3に配備することを表す。主なシミュレーションの結果を表2にまとめる。表より、平均対応時間の短縮については、現状の配備{1,1,2,3}が最適であることが確かめられる。また、配備{1,1,1,1}などいくつかの消防署を廃止するという配備も考えられるが、平均対応時間と呼損率を現状の配備より適切にすることはないことが確かめられている。

4.2 配備場所の変更

現在、署1(本署)には2台の救急車が配備されている。そこで、新たに1箇所の消防署を建設し、4箇所の消防署に救急車を1台ずつ配備することにより救急車システムの効率化を試みる場合について実験を行う。新たな消防署の候補地は、稲川ら[3]の実験にある5箇所の候補地を用いる。図8に、建設する消防署の候補地の位置を図示する。この実験では、それぞれの候補地について1箇所の消防署を建設するとき、救



- 1 本署 ● 4 赤津交差点 ● 7 長根小学校
- 2 東署 ● 5 南山大学 ● 8 西陵小学校
- 3 南署 ● 6 中央病院

図8 新設消防署の候補地

表2 実験1の主なシミュレーション結果

救急車の配備	平均対応時間(分)	呼損率
{ 1, 1, 2, 3 }	5.3081	0.0031
{ 1, 2, 3, 3 }	5.4727	0.0032
{ 1, 2, 2, 3 }	5.5354	0.0033

表3 実験2の主なシミュレーション結果

救急車の配備	平均対応時間(分)	呼損率
{ 1, 2, 3, 6 }	4.9358	0.0033
{ 1, 2, 3, 7 }	5.0838	0.0034
{ 2, 3, 6, 6 }	5.1767	0.0032

表4 実験3のシミュレーション結果

救急車の配備(5台)	平均対応時間	呼損率
{ 1, 1, 2, 3, 3 }	5.1281	0.0004
{ 1, 1, 2, 2, 3 }	5.1499	0.0004
(3台) { 1, 2, 3 }	5.8324	0.0218

表5 実験4の主なシミュレーション結果

救急車の配備(5台)	平均対応時間	呼損率
{ 1, 2, 3, 6, 6 }	4.7550	0.0004
{ 1, 1, 2, 3, 6 }	4.7899	0.0004
{ 1, 2, 3, 3, 6 }	4.8260	0.0004

急車を配備可能なすべての組合せについてシミュレーションを行う。シミュレーションの結果、平均対応時間が短い上位3組の配備を表3にまとめる。表より、平均対応時間が最も短いのは配備 {1,2,3,6} であり、新たな消防署は候補地6(中央病院)に建設するのが適切であることがわかる。また、表2中の現状と比較すると、候補地6に消防署を建設することにより、平均対応時間がおよそ0.3723分(22.34秒)短縮される可能性があることがわかる。

4.3 配備台数の変更

ここでは、新たに救急車を1台追加することによって救急車システムの効率化を試みる。救急車追加の効果のみを測るため、実験2とは異なり新たな消防署の建設はしないものとする。シミュレーションの結果、平均対応時間が短い上位2組の配備を表4中にまとめる。表より、現在の消防署のみを利用する場合は署3(南署)に配備することが平均対応時間を最も短くする。表2中の現状と比較すると、5台目を署3に追加することにより、およそ0.1799分(10.80秒)短縮される可能性がある。

ただし、実験2と比較すると、5台目を追加する効果は比較的小さい。そこで救急車が3台の場合についてもシミュレーションを行い、結果を表4中の配備 {1,2,3} に示す。救急車が3台しかない場合の平均対応時間は5.8324分であり、平均対応時間は表2中の

現状より30秒以上遅延する。また、呼損率もおよそ2%となり大幅に増加する。瀬戸市では、救急車の台数を3台から4台にする効果は大きい、4台から5台にする効果は比較的小さいという状況がわかる。

4.4 配備場所と台数の変更

次に、新たな消防署を1箇所と救急車を1台追加可能な場合について実験する。この実験では、それぞれの消防署を1箇所建設するとき、5台の救急車を配備可能なすべての組合せについてシミュレーションを行う。シミュレーションの結果、平均対応時間が短い上位3組の配備を表5にまとめる。これを見ると、平均対応時間が最も短いのは配備 {1,2,3,6,6} であり、現状と比較すると平均対応時間がおよそ0.5531分(33.19秒)短縮される可能性があることがわかる。この配備は今回の実験の中で最も平均対応時間を短くする。しかしながら、救急車が1台少ない配備 {1,2,3,6} との差は0.1808分(10.85秒)であり、実験3と同じく5台目を追加する効果は比較的小さい。

4.5 配備台数の効果

実験1から4の結果より、瀬戸市では5台目の救急

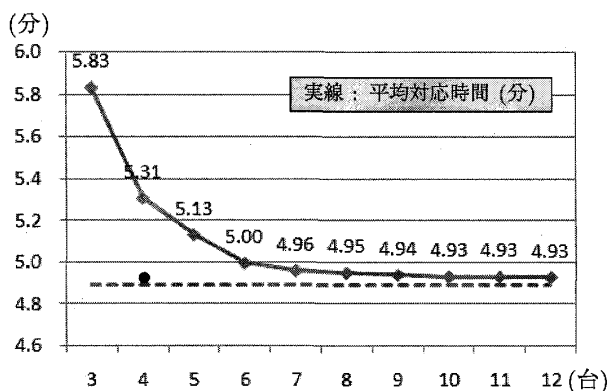


図9 救急車の配備台数と平均対応時間

車を追加するよりも、新たな消防署を建設する方が平均対応時間を短縮することがわかる。特に、平均対応時間においては、新たな消防署の建設は救急車の購入のおよそ2倍の効果を持つ。そこで次に、配備台数と平均対応時間の関係に関するシミュレーション実験を行う。この実験では、救急車の配備場所を現在の署1, 2, 3に限定して、配備台数を変化させるときの最適配備の平均対応時間をそれぞれ求める。このシミュレーション実験の結果を図9に示す。ただし、1台, 2台の場合の平均対応時間はそれぞれ11.1982分(呼損率0.3897), 8.2839分(呼損率0.11081)であるが、尺度が大きく異なるので図中では省略する。図9をみると、救急車の台数を増やすことによって平均対応時間は短縮されるが、その効果は逓減する様子がわかる。

さらに、救急車の台数が無限の場合も考える。このとき、救急車システムでは混雑が生じないため、すべての呼出しが最も近い救急車に割当てられる。よって、無限台数の場合の平均対応時間は、すべての呼出し地点から最近消防署への移動時間の平均と出場までの準備時間の和により計算できる。この場合の平均対応時間は4.8926分であり、図9中の破線はこの数値を表す。図より、平均対応時間がこの破線に収束してゆく様子がわかる。よって、署1, 2, 3のみを利用する場合、平均対応時間を4.8926分より短くすることはできないものと考えられる。

一方で、実験2の結果より、救急車が4台の配備{1,2,3,6}のときの平均対応時間は4.9358分である。図9中に黒丸でこれを示す。このとき、救急車10台のときと同程度の短縮が可能になることがわかる。署1,2,3,6を利用する場合についても、同様に無限台数を配備する状況を考えて4.5716分となる。よって、

配備{1,2,3,6}では、新たな消防署を建設して図9中の破線の制約を打ち破ることにより、平均対応時間を大幅に減少させることが可能になると考えられる。ただし、この結果は各救急車システムの混雑の度合いによって変化すると思われる。

5. おわりに

本研究では、シミュレーション実験を用いて救急車システムの効率化について議論した。実験を行った瀬戸市では、5台目の救急車を購入するよりも、新たに消防署を候補地6に建設する方が、平均対応時間を2倍も短縮することがわかった。この結果より、救急車システムの適正化を効果的に行うためには、対応策を適切に評価して意思決定を行うことが重要であることが確認できた。これらの実験結果が今後の配備計画の参考となることを期待する。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究(B))課題番号:20710123の補助を受けた。ここに記して深く感謝する。

参考文献

- [1] L. Brotcorne, G. Laporte and F. Semet: Ambulance location and relocation models, *European Journal of Operational Research* 147 (3), pp. 451-463, 2003.
- [2] R. C. Larson: A hypercube queueing model for facility location and redistricting in urban emergency services, *Computer & Operational Research* 1, pp. 67-95, 1974.
- [3] 稲川敬介, 鈴木敦夫: 連続時間型マルコフ連鎖を用いた緊急車両の最適配備問題について, *日本OR学会和文論文誌* 47, pp. 25-39, 2004.
- [4] 稲川敬介, 古田壮宏, 鈴木敦夫: 複数の速度を持つ道路網データを利用した救急車の配備問題について, *都市計画論文集* No. 41-3, pp. 259-264, 2006.
- [5] 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評価指標とその重要性について, *都市計画論文集* No. 42-3, pp. 469-474, 2007.
- [6] 両角光男: 施設配置計画評価のためのメディアン問題と最短路問題解析算法の効率化, *日本建築学会計画系論文報告集* 第347号, pp. 55-65, 1985.
- [7] 消防庁編: 平成20年版消防白書, ぎょうせい, 2008.
- [8] 瀬戸市役所: 瀬戸市オフィシャルサイト, <http://www.city.seto.aichi.jp>, 2002-2009にアクセス.