

異なる車両台数に対する緊急車両の管区割り問題

稲川 敬介 鈴木 敦夫*

南山大学

概要

本論文では、異なる車両台数に対する緊急車両の管区割り問題を考える。需要であるサービス要求は Poisson 規程にしたがって発生する。発生した需要は、発生したとき利用可能である緊急車両の中で、最も近い緊急車両からサービスを受ける。ここでは、はじめに二つのノードとそれらを連結する 1 本の枝のみを持つ単純な線分都市における管区割り問題を考える。車両配備台数が異なる場合の最適な管区割りをおこなうことにより、最適な境界が車両配備台数の差異による影響を受けることを数値的に示す。さらに、このような影響を持つ応用例として、愛知県瀬戸市の救急車の管区割り問題を考える。

キーワード: 公共サービス, 施設計画, マルコフ過程, OR の実施, 配置問題

1 はじめに

本論文では、異なる車両台数に対する緊急車両の管区割り問題を考える。一般的に、区割り問題はわれわれの身近にある問題の一つであり、小学校などの学区や選挙区の区割り問題などがその例である。このような区割り問題では、一つの区とそれ以外の区は独立に扱われる。たとえば、小学校などの学区の区割り問題では、ある区に属する需要はその区内の学校に通い、それ以外の学校に通うことはない。しかしながら、救急車などの緊急車両における担当区の区割り問題では、独立に扱えない場合がある。たとえば、2 台の救急車 s_1, s_1 が 2 箇所に配備されているときを考える。また、それぞれの救急車に最も近い領域をそれぞれの担当区とする。救急車 s_1 の担当区内で需要が発生したとき、この需要は救急車 s_1 を呼出し、サービスを受ける。しかしながら、救急車は一つの需要にサービス中である間、それ以外の需要に対応することができない。よって、需要が発生したときすでに救急車 s_1 が他の需要に対応中である場合、この需要は s_1 を呼出すことができない。このような場合、救急車 s_2 が利用可能であるなら、需要は担当区外の救急車である s_2 を呼出し、サービスを受ける。すなわち、このような区割り問題は、優先順序という順序制約を付加された区割り問題であると考えられる。これを緊急車両の管区割り問題と呼ぶことにする。

緊急車両の管区割り問題における過去の研究の一つに、Carter et al. [4] がある。ここでは、2 台の緊急車両をそれぞれ異なる場所に配備したとき、それぞれの緊急車両が第一優先に対応する領域を求めている。彼らはこの問題に対し、4 状態を持つ連続時間型マルコフ連鎖を用いてモデル化をおこなっている。本研究では、2 台以上の緊急車両に対する問題を考

*本研究は南山大学パツヘ研究奨励金 I-A, 科学研究費 (基盤研究 A(2)) 16201035 の援助を受けた。

える．また，緊急車両が3台以上の問題においては，異なる台数の緊急車両が複数箇所に配備される場合の最適な管区割りを考える．

2章では，二つのノードとそれらを連結する1本の枝のみを持つ単純な線分都市を考える．それぞれのノード上には緊急車両格納施設があり，ここにいくつかの緊急車両を配備する．このとき，緊急車両の台数を变化させた場合を考え，それぞれの場合における最適な管区を求める．これにより，一つの緊急車両格納施設に複数台配備したとき，配備台数の差異による効果が存在することを数値的に確かめる．3章では，配備台数の差異が存在する場合の応用例として，愛知県瀬戸市の救急車の管区割り問題を考える．瀬戸市は4台の救急車を保有していて，それらを3箇所の緊急車両格納施設に2台，1台，1台と配備している．この問題に対して，配備台数の差異による効果を考慮した適切な管区の作成をおこなう．

2 線分都市における区割り問題

ここでは，二つのノードとそれを連結する1本の枝のみを持つ単純な線分都市に対する管区割り問題を考える．図1は，このような線分都市の例である．それぞれのノード上には，緊急車両格納施設 F_1, F_2 があり，それぞれ複数台の緊急車両を配備可能とする．ノードを連結する枝の長さは一般性を失うことなく1とする．問題を単純にするため，需要は枝上に連続的かつ一様に分布していると仮定する．発生した需要は，発生したとき利用可能な緊急車両の中で，最も近い緊急車両格納施設で待機している緊急車両からサービスを受ける．このとき，枝上には二つの領域が存在する．それらは，緊急車両格納施設 F_1 に最も近くかつ F_2 に二番目に近い領域と， F_2 に最も近くかつ F_1 に二番目に近い領域の二つである．前者を管区 V_1 ，後者を管区 V_2 とする．また，管区 V_1 と V_2 の境界を bp で表す．

それぞれの需要は Poisson 規律にしたがって発生すると仮定する．一つの需要に対する緊急車両のサービス時間は，緊急車両の移動時間に依存する指数分布にしたがうと仮定する．また，すべての緊急車両が利用可能でないときに発生した需要は，呼損となることを仮定する．最適化の目的として，平均対応時間と呼損率を考える．ここで平均対応時間とは，需要が発生してから緊急車両が需要の発生現場に到着するまでの時間である．また，呼損率とはすべての緊急車両が利用可能でない確率である．

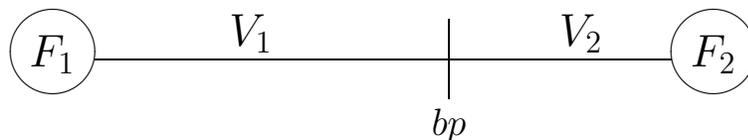


図 1: 二つのノードを持つ線分都市

2.1 数値計算実験

二つの目的，平均対応時間と呼損率は，いずれも稲川，鈴木 [12] のモデルを適用して計算する．このモデルでは，管区 V_1 と V_2 のそれぞれの重心から異なる種類の需要が発生す

ると仮定し、連続時間型マルコフ連鎖を適用してモデル化する。計算に必要な情報として、長さが1の枝上における移動速度を20とし、移動以外に必要なサービス時間を40と設定する。また、枝全体の需要に対する平均発生時間間隔を90とする。さらに、呼損が起きた場合のペナルティとして、呼損費用を10と設定する。このとき、格納施設 F_1 を原点として、管区 V_1 と V_2 の境界である bp を区間 $[0, 1]$ 内で変化させたときの平均対応時間と呼損率を求める。また、それぞれの緊急車両施設 F_1, F_2 に対する緊急車両の配備状況を配備 (F_1 の配備台数, F_2 の配備台数) で表すことにする。この表記を用いれば、 F_1 に2台、 F_2 に1台の緊急車両を配備したときの配備状況は配備 (2, 1) で表される。

はじめに、配備 (1, 1)、すなわち緊急車両配備施設 F_1, F_2 にそれぞれ1台ずつの緊急車両を配備したときの最適な境界 bp を求める。このとき、平均対応時間を最小とする最適な境界は線分都市の中心である $bp = 0.5$ となる。また、呼損率を最小とする最適な境界も、同じく $bp = 0.5$ となる。境界 $bp = 0.5$ の下での平均対応時間 r と呼損率 P_l はそれぞれ $r = 6.9664, P_l = 0.0827$ となる。配備 (1, 1) において、 bp を区間 $[0, 1]$ 内で変化させたときの平均対応時間 r の関数と呼損率 P_l の関数は図2となる。

次に、配備 (2, 1) における最適な境界 bp を求める。このとき、平均対応時間を最小とする境界は $bp = 0.56$ となり、線分都市の中心である0.5とは異なる点で最小値を得る。境界 $bp = 0.56$ における平均対応時間 r と呼損率 P_l はそれぞれ $r = 6.0469, P_l = 1.3837 \times 10^{-2}$ となる。また、呼損率を最小とする最適な境界は $bp = 0.57$ となり、このときの平均対応時間と呼損率はそれぞれ $r = 6.0479, P_l = 1.3833 \times 10^{-2}$ となる。このときの平均対応時間の関数と呼損率の関数は図3となる。

さらに、配備 (3, 1) における最適な境界 bp を求める。このとき、平均対応時間を最小とする境界は $bp = 0.58$ となり、そのときの平均対応時間 r と呼損率 P_l は、それぞれ $r = 5.8641, P_l = 1.7840 \times 10^{-3}$ となる。また、呼損率を最小とする境界は $bp = 0.62$ となり、そのときの目的関数値は $r = 5.9047, P_l = 1.7795 \times 10^{-3}$ となる。このときの平均対応時間と呼損率の目的関数値は図4となる。

最後に、配備 (2, 2)、すなわち F_1, F_2 に2台ずつの緊急車両が配備されたときにおける最適な境界 bp を求める。このとき、配備 (1, 1) の場合と同様に、平均対応時間を最小とする最適な境界は $bp = 0.5$ となる。また、呼損率を最小とする最適な境界も、同じく $bp = 0.5$ となる。境界 $bp = 0.5$ の下での平均対応時間 r と呼損率 P_l は、それぞれ $r = 5.2621, P_l = 1.6944 \times 10^{-3}$ と得られる。このとき、配備 (3, 1) と配備 (2, 2) を比較すると、最適な管区を用いた場合、平均対応時間と呼損率の両方において配備 (2, 2) の方がより小さな目的関数値を得る。この数値計算実験では需要が一様に分布していると仮定しているので、この結果は直観にしたがう。

表1は、それぞれの数値計算実験における適切な境界 bp とそのときの目的関数値の一覧である。この数値計算実験から、緊急車両の重複配備による効果が適切な管区割りの決定に影響を与えているということが導かれる。また、その効果は平均対応時間の最小化よりも呼損率の最小化において、より大きくあらわれることがこの数値計算実験から導かれる。

表 1: 配置と境界の関係

平均対応時間の最小化

(F_1, F_2)	bp	r	P_l
(1, 1)	0.50	6.9664	8.2651×10^{-2}
(2, 1)	0.56	6.0469	1.3837×10^{-2}
(3, 1)	0.58	5.8641	1.7840×10^{-3}
(2, 2)	0.50	5.2621	1.6944×10^{-3}

呼損率の最小化

(F_1, F_2)	bp	r	P_l
(1, 1)	0.50	6.9664	8.2651×10^{-2}
(2, 1)	0.57	6.0479	1.3833×10^{-2}
(3, 1)	0.62	5.9047	1.7795×10^{-3}
(2, 2)	0.50	5.2621	1.6944×10^{-3}

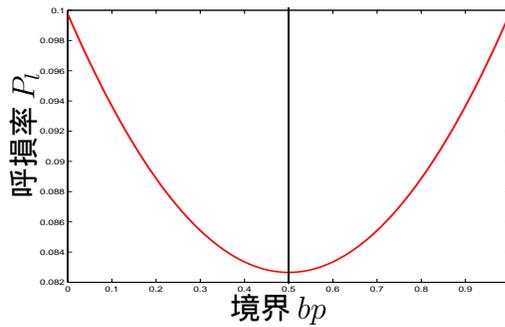
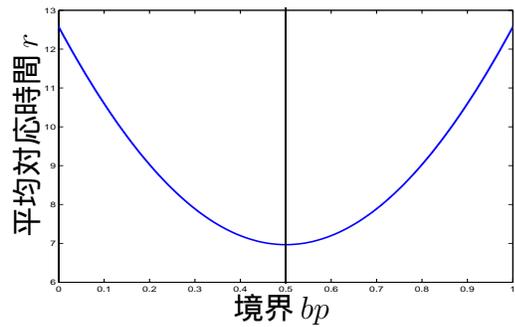


図 2: 配備 (1, 1) の目的関数値

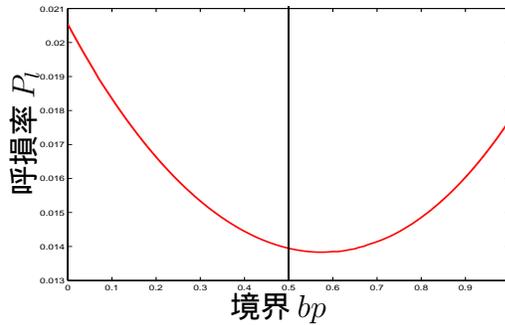
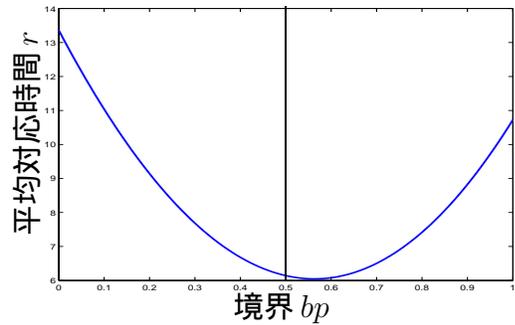


図 3: 配備 (2, 1) の目的関数値

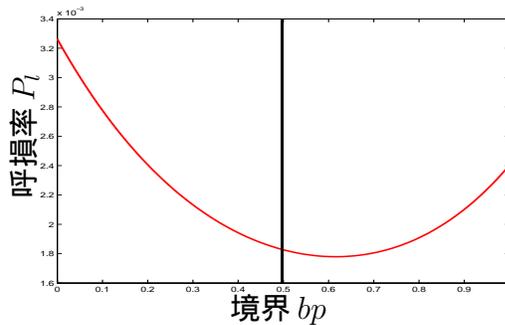
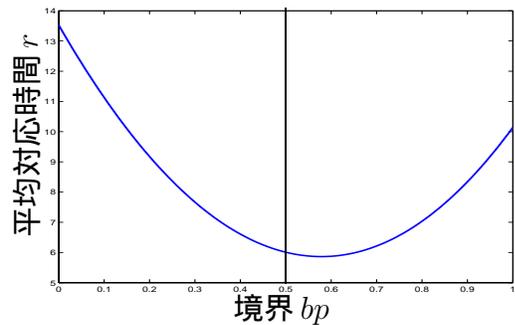


図 4: 配備 (3, 1) の目的関数値

2.2 重みと利用率 ρ との関係

先の数値計算実験では、緊急車両の配備台数の変化による最適な境界 b_p の変化を数値的に確かめた。ここでは、配備台数を配備 (2, 1) に固定し、需要量の変化により最適な境界も変化することを確かめる。需要量の変化は、線分都市全体の発生時間間隔を変化させることによって実現する。発生時間間隔の変化は、現実の問題でもしばしば起こる現象である。たとえば、緊急車両が救急車の場合では、住民の増加による救急車の呼出し件数の増加などが考えられる。以下の数値計算実験からは、このような場合の意思決定についても考察することができる。

これまでの数値計算実験例における発生時間間隔 90 を基準とし、これを w_Λ 倍したときの目的関数値をそれぞれ計算する。また、平均対応時間 r は、数値計算実験においてわれわれが設定した移動速度などに大きく依存するため、ここでは利用率 ρ も同じく計算する。利用率 ρ は、以下の式で求められる。

$$\rho = \sum_j \frac{\lambda_j}{\sum_i \mu_{i,j}}. \quad (1)$$

ここで、 λ_j は管区 V_j の需要の発生率、 $\mu_{i,j}$ は管区 V_j から発生した需要が車両 S_i からサービスを受けたときのサービス率である。

図 5 は、それぞれ平均対応時間 r 、呼損率 P_l 、利用率 ρ と境界線 b_p との関係を図示したものである。また、表 2 は、このときの具体的な関数値の一部である。表 2 において、たとえば $w_\Lambda = 2.0$ は、全体の発生時間間隔を 2 倍にした場合である。発生時間間隔を 2 倍にすることは、全体の需要数がおよそ半数に減少することを意味する。このとき、境界 b_p は約 0.0188 だけ中心による。この数値計算実験により、最適な境界が利用率によって変化することが導かれる。

また、数値計算実験結果を全体的に見ると、発生時間間隔が大きくなる場合、すなわち需要数が少なくなると、最適な境界 b_p は線分都市の中心である 0.5 に近づく。逆に、需要の発生時間間隔が小さい場合、すなわち需要が頻繁に発生する場合、境界 b_p は線分都市の中心から離れることがわかる。 $w_\Lambda = 0.2$ としたとき、われわれの計算で求められた境界の最大値 $b_p = 0.5766$ を得る。また、図 5 を見ると、利用率 ρ が 0.5 以上において境界 b_p は、あまり変化しない。これらのことから ρ と b_p の関係は逓減関数であることが推察される。

2.3 数値計算実験結果

これらの数値計算実験結果より以下のことが導かれる。図 2 と表 1 より、2 つの車両格納施設に等しい台数の緊急車両を配備したとき、適切な境界 b_p は線分都市の中央となる。また、2 つの車両格納施設に異なる車両台数を配備した場合、境界が 2 つの車両格納施設の中央であるとは限らない。さらに、車両台数の差や緊急車両の利用率 ρ などによっても、適切な境界は変化する。

図 3 と図 4 を比較することにより、2 つの車両格納施設に配備される緊急車両台数の差が大きいほど、境界 b_p は線分都市の中央から離れる。さらに、図 5 の利用率 ρ と境界 b_p との関係より、緊急車両の利用率が増加すると共に、境界 b_p も線分都市の中央から離れる。た

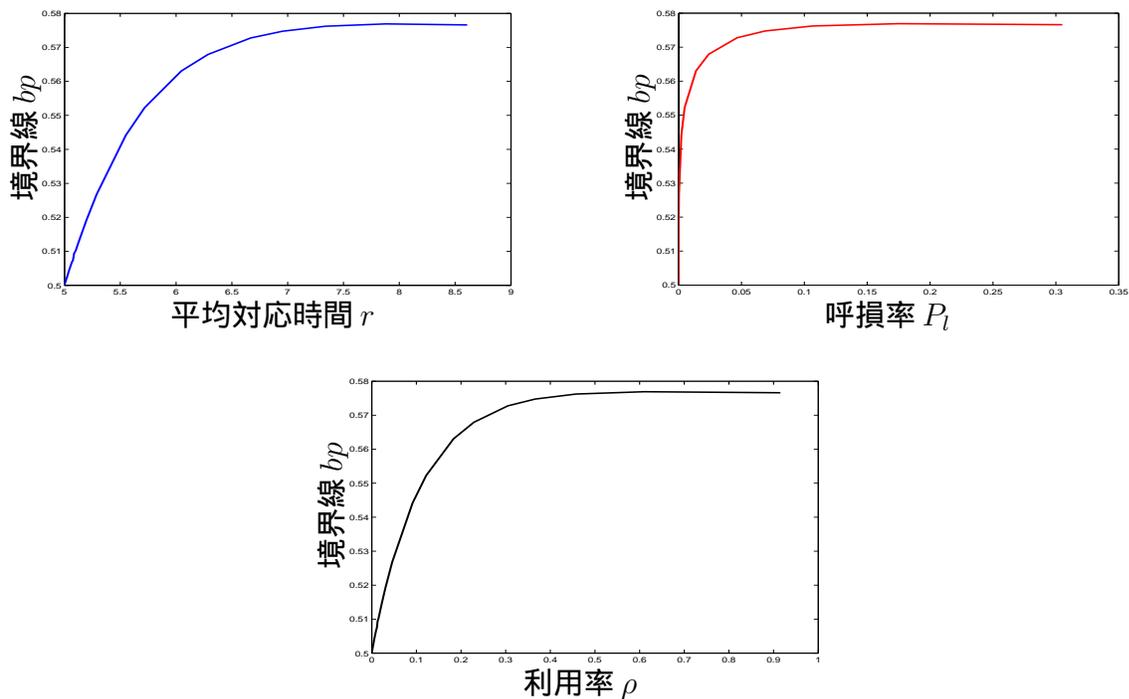


図 5: 領域全体の発生時間間隔を変化させたときの境界 bp

表 2: 領域全体の発生時間間隔を w_Λ 倍にしたときの境界 bp

w_Λ	bp	r	P_l	ρ
800.0	0.5001	5.0016	0.00000019	0.00022942
100.0	0.5013	5.0124	0.00001170	0.00183521
10.0	0.5121	5.1205	0.00002288	0.01833999
2.0	0.5442	5.5505	0.00220035	0.09157079
1.0	0.5630	6.0467	0.01383498	0.18306131
0.5	0.5747	6.9536	0.06868217	0.36607644
0.2	0.5766	8.6080	0.30520481	0.91518222

だし, 利用率 ρ と境界 bp の関係は逓減関数となり, 利用率 ρ が大きいとき ρ の変化による境界 bp の変化は小さい.

3 瀬戸市における救急車の管区への応用

ここでは, 数値計算実験結果により得られた結果の応用例として, 愛知県瀬戸市における救急車の管区割り問題を考える. 瀬戸市は 4 台の救急車を保有しており, それらを 3 箇所の車両格納施設に配備している. 4 台の救急車は, 本署に 2 台, 東署に 1 台, 南署に 1 台と配備されている. また, 瀬戸市では市全体を六つの管区に分割している. 図 6 は, 六つの管区を表した図である.

たとえば, 管区 2 は, 本署, 東署, 南署という割当てに関する優先順位を持っている. す

なわち、管区2で発生した需要は、はじめに本署でサービス可能かどうかを調べる．本署の救急車がサービス可能である場合は、この需要は本署の救急車からサービスを受ける．しかしながら、本署の救急車がサービス可能でない場合は、次に東署でサービス可能かどうかを調べる．東署の救急車がサービス可能である場合は東署の救急車からサービスを受け、そうでない場合は最後に南署でサービス可能かどうかを調べる．南署の救急車がサービス可能である場合は南署の救急車からサービスを受け、そうでない場合は瀬戸市内のすべての救急車がサービス可能でない．このような場合は、近隣の自治体に応援を要請し、需要は市外の救急車からサービスを受ける．

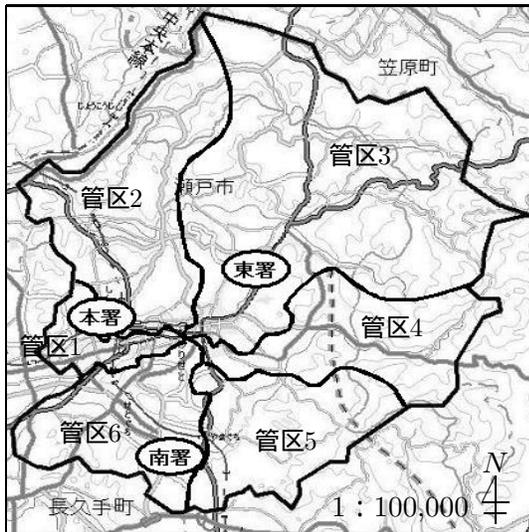


図 6: 瀬戸市の管区 $K(\text{seto})$

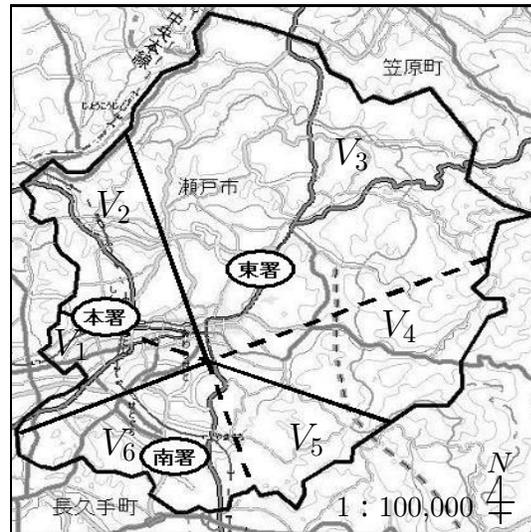


図 7: 瀬戸市におけるボロノイ図

瀬戸市では本署に2台の救急車が配備されている．この場合、先の数値計算実験の結果より、単純に近さだけで決定した管区割り最適であるとは言えない．近さだけで管区割りをおこなった場合、その決定方法は二次のボロノイ図と同様である．図7は、各緊急車両格納施設を核としたユークリッド距離における二次のボロノイ図である．瀬戸市の管区は、消防署員の経験と市の成り立ちから決定されたものであるが、この図を見ると、大まかに見て二次のボロノイ図に準じていることがわかる．

3.1 重み付き管区

先に扱った数値計算実験例では需要が枝上に連続に分布していると仮定したが、ここでは町丁目単位に離散的に分布していると仮定する．よって、この応用例では、それぞれの町丁目に対して適切な管区番号を与えることを管区割り問題とする．平成15年6月現在、瀬戸市には364の町丁目が存在している．瀬戸市の救急車における緊急車両格納施設は本署、東署、南署の3署である．各署からそれぞれの町丁目までの移動費用(到着時間)を移動費用行列 $\{d_{ik}\}$ で表す．ここで $i = 1, 2, 3$ であり、それぞれ本署、東署、南署から各町丁目までの移動費用を表す．

各車両格納施設の車両台数の差異による効果は、以下の移動費用行列に対する重み付けによって表現する．関数 $w_{*w}^{(j)}(\{d_{ik}\})$ を、移動費用行列 $\{d_{ik}\}$ の $d_{j,k}$ に w の乗法的重み付けをお

こなう関数とする． $\{d_{1k}\}$ を本署からの移動費用行列とすれば，瀬戸市のモデルにおける本署に対する乗法的重み付けは以下となる．

$$(\text{乗法的重み付け}) \quad w_{*\omega}^{(1)}(\{d_{ik}\}) \equiv w_{*\omega}^{(1)}(\{d_{1k}, d_{2k}, d_{3k}\}) \equiv \{\omega d_{1k}, d_{2k}, d_{3k}\} \quad (2)$$

同様に，関数 $w_{+\omega}^{(j)}(\{d_{ik}\})$ を，移動費用行列 $\{d_{ik}\}$ の $d_{j,k}$ に ω の加法的重み付けをおこなう関数とする．瀬戸市のモデルにおける加法的重み付けは以下となる．

$$(\text{加法的重み付け}) \quad w_{+\omega}^{(1)}(\{d_{ik}\}) \equiv w_{+\omega}^{(1)}(\{d_{1k}, d_{2k}, d_{3k}\}) \equiv \{d_{1k} + \omega, d_{2k}, d_{3k}\} \quad (3)$$

管区の決定には，移動費用(到着時間)の最小化を目的とする単純な線形計画法を用いる [11]．瀬戸市の管区割り問題を以下のように定式化する．

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \sum_k \left\{ (\alpha d_{1k} + \gamma d_{2k} + \beta d_{3k}) x_{k1} \right. \\ & + (\alpha d_{1k} + \beta d_{2k} + \gamma d_{3k}) x_{k2} \\ & + (\beta d_{1k} + \alpha d_{2k} + \gamma d_{3k}) x_{k3} \\ & + (\beta d_{1k} + \gamma d_{2k} + \alpha d_{3k}) x_{k4} \\ & + (\gamma d_{1k} + \beta d_{2k} + \alpha d_{3k}) x_{k5} \\ & \left. + (\gamma d_{1k} + \alpha d_{2k} + \beta d_{3k}) x_{k6} \right\} \\ \text{subject to} \quad & \sum_{j=1}^6 x_{kj} = 1 \quad \forall j, \\ & 0 \leq x_{kj} \leq 1 \quad \forall j, k. \end{aligned} \quad (4)$$

ここで， α, β, γ は，十分な大きさを持ち $\alpha > \beta > \gamma$ の関係を保つ任意定数である． d_{ik} は i 署から k 町丁目までの移動費用であり， x_{kj} は k 町丁目を管区番号 j に定める決定変数である．重み付き移動費用行列によって決定される管区を，重み付き管区と呼ぶことにする．乗法的重み付き移動費用行列 $w_{*\omega}^{(j)}(\{d_{ik}\})$ によって生成される重み付き管区を記号 $\kappa_{*\omega}^{(j)}$ で，加法的重み付き移動費用行列 $w_{+\omega}^{(j)}(\{d_{ik}\})$ によって生成される重み付き管区を記号 $\kappa_{+\omega}^{(j)}$ で表す．同様の記号を用いて，瀬戸市の管区を $\kappa^{(seto)}$ で，重みを付けない場合の管区を $\kappa^{(0)}$ で表す．

3.2 管区の評価

管区の評価には，瀬戸市消防本部のデータを用いて計算をおこなう．評価対象とするのは，平成 15 年の 8:00 から 22:00 までの時間帯である．時間帯を限定するのは，昼間と夜間では需要の発生件数に明らかな違いがあるためである [12]．移動費用は移動費用行列 $\{d_{ik}\}$ を用いる．移動以外に必要なサービス時間は 46.6434 分，呼損費用は 9.4000 分，全体における需要の発生時間間隔は 84.4313，また，需要発生時刻から救急車が実際に出場するまでに必要な時間は 1.3237 分と設定する．配備車両台数の差異を考慮した適切な管区を得るための一つの方法として，ここでは以下の方法を採用する．いくつか重み付き管区を作成し，それぞれの重み付き管区を評価する．この計算で得られた重み付き管区の中で最も適切な重み付き管区を最適な重み付き管区とする．

図 8 は，本署に対する乗法的重み付き管区 $\kappa_{*\omega}^{(1)}$ において， $\omega = [0.5, 1.5]$ の場合の平均対応時間 r を示したものである．また，表 3 は，それぞれの重み付き管区における平均対応

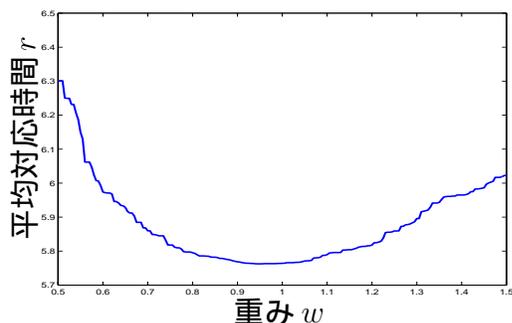


図 8: 重み w における平均対応時間

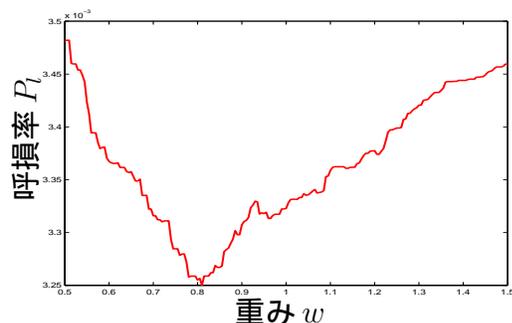


図 9: 重み w における呼損率

表 3: 平均対応時間 r の最小化の結果

管区	重み	平均対応時間	呼損率 ($\times 10^{-3}$)
$\kappa^{(0)}$	なし	5.763989	3.3229
$\kappa_{*0.949}^{(1)}$	*0.949	5.762523	3.3194
$\kappa_{*1.060}^{(2,3)}$	*1.060	5.762532	3.3186
$\kappa_{+,-0.330}^{(1)}$	-0.330	5.762569	3.3181
$\kappa_{+,0.330}^{(2,3)}$	+0.330	5.762569	3.3181

表 4: 呼損率 P_l の最小化の結果

管区	重み	平均対応時間	呼損率 ($\times 10^{-3}$)
$\kappa_{*0.810}^{(1)}$	*0.810	5.789367	3.2503
$\kappa_{*1.250}^{(2,3)}$	*1.250	5.795033	3.2551
$\kappa_{+,-1.500}^{(1)}$	-1.500	5.809173	3.2693
$\kappa_{+,1.500}^{(2,3)}$	+1.500	5.809173	3.2693

時間についての最適な重みと、そのときの目的関数値である。同様に、図 9 は、本署に対する乗法的重み付き管区 $\kappa_{*\omega}^{(1)}$ において、 $\omega = [0.5, 1.5]$ の場合の呼損率 P_l を示したものである。また、表 4 は、それぞれの重み付き管区における呼損率についての最適な重みと、そのときの目的関数値である。ただし、いずれの目的関数も滑らかな関数ではない。また、最適な重みは一点とは限らない。これは、重みを変化させても管区が変更されない場合があるためである。たとえば、平均対応時間における加法的最適化をおこなう場合、 ω が区間 $[-0.330, -0.350]$ 内の値である場合は同一の管区が得られる。当然ながら、このとき目的関数値も同一となる。

表 3 より、平均対応時間における最も適切な管区は、本署に対して乗法的重み $\omega = 0.949$ を重み付けする場合である。このとき平均対応時間は $r = 5.762523$ であり、呼損率は $P_l = 3.3194 \times 10^{-3}$ と得られる。その他の重み付けをおこなう場合も、非常に近い目的関数値を得ることができる。しかしながら、この計算では加法的重み付けよりも、乗法的重み付けをおこなう方がより短い平均対応時間を得られる。また、本署以外への重み付けよりも、本署に重み付けをおこなう方がより短い平均対応時間を得られる。

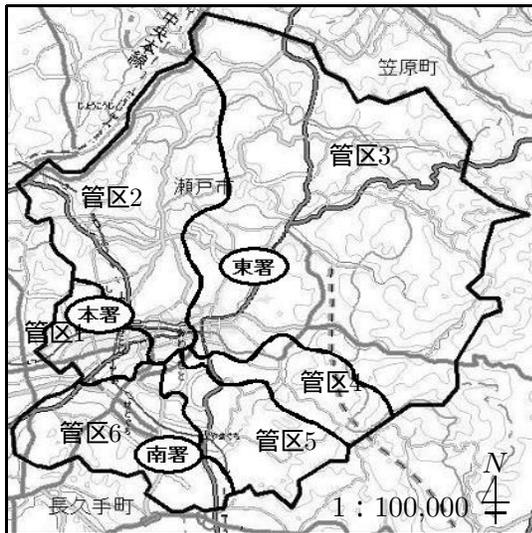


図 10: 重みなしの管区 $\kappa^{(0)}$

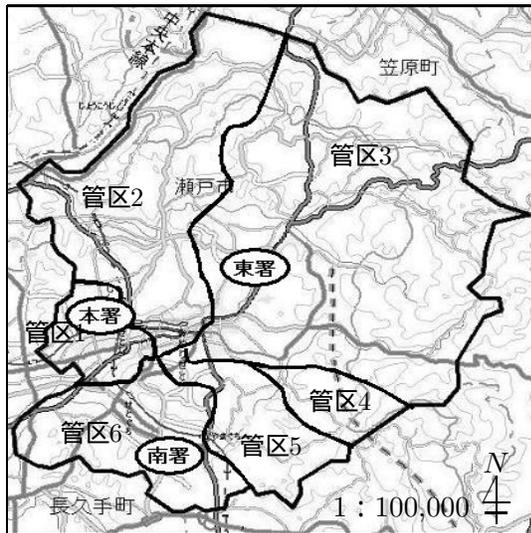


図 11: 乗法的重み付き管区 $\kappa_{*0.949}^{(1)}$

表 4 より，呼損率における最も適切な管区は，本署に対して乗法的重み $\omega = 0.810$ を重み付けする場合である．このとき平均対応時間は $r = 5.789367$ であり，呼損率は $P_l = 3.2503 \times 10^{-3}$ と得られる．平均対応時間の場合と同様に，その他の重み付けをおこなう場合も，非常に近い目的関数値を得ることができる．しかしながら，この計算では加法的重み付けよりも，乗法的重み付けをおこなう方がより小さな呼損率を得ることができる．また，本署以外への重み付けよりも，本署に重み付けをおこなう方がより小さな呼損率を得ることができる．

3.3 重み付き管区の効果

ここでは，瀬戸市の管区 $\kappa^{(seto)}$ と重みを付けない場合の管区 $\kappa^{(0)}$ ，前節で得られた最適な重み付き管区 $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ との比較をおこなう．この比較により，重み付き管区の効果を考察する．図 10 と図 11 は，それぞれ管区 $\kappa^{(0)}$ と管区 $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ を瀬戸市の地図上で示した図である．

はじめに，平均対応時間について比較をおこなう．表 5 は，管区 $\kappa^{(seto)}$ ， $\kappa^{(0)}$ ， $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ を適用したとき，モデルから得られるそれぞれの平均対応時間である．また，平均対応時間を地域別に比較するため，瀬戸市の六つの管区 1, 2, ..., 6 ごとの平均対応時間も示す．瀬戸市の六つの管区を基準とすることにより，管区が異なる場合においても，同一の地域で比較することが可能である．

瀬戸市の管区を用いた場合の平均対応時間は 5.8119 である．管区 $\kappa^{(0)}$ を用いた場合の平均対応時間は 5.7640 であり，管区 $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ を用いた場合の平均対応時間は 5.7625 である．瀬戸市の管区と比較すると，管区 $\kappa^{(0)}$ を用いた場合は 0.0479 分 (2.87 秒) だけ短縮され，管区 $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ を用いた場合は 0.0493 分 (2.96 秒) だけ短縮される．管区 $\kappa^{(0)}$ と管区 $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ の比較によって得られる，重み付けによる効果は 0.0014 分 (0.09 秒) ほどである．

表 5 において管区 $\kappa^{(0)}$ と $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ を比較すると，重みを付けることにより管区 1, 2 の平均対応時間は増加し，それ以外の管区の平均対応時間は減少する．この結果は，管区 1, 2 の需要にとって不利益を被ることを意味する．しかしながら，管区 4, 5, 6 以外の平均対応時間は管区 1, 2 のそれより 1 分，またはそれ以上長い．よって，重み付けをおこなうことにより，

表 5: 平均対応時間の比較 (H.16.6)

管区	管区 1	管区 2	管区 3	管区 4	管区 5	管区 6	全体
$\kappa^{(seto)}$	5.8401	5.1981	5.7371	7.0923	6.5440	6.0998	5.8119
$\kappa^{(0)}$	5.8458	5.2071	5.7562	7.1045	6.5151	6.0709	5.7640
$\kappa_{*0.949}^{(1)}$	5.8504	5.2135	5.7439	7.0963	6.5043	6.0620	5.7625

表 6: 平均対応時間が短縮する人口と増加する人口

	管区 1	管区 2	管区 3	管区 4	管区 5	管区 6	全体
瀬戸市の人口	17199	37455	23406	3955	10739	39347	132101
短縮	201	1729	20047	3116	10730	32626	68449
増加	16998	35726	3359	839	9	6721	63652

表 7: 第一優先順位の救急車に割当てられる確率

管区	管区 1	管区 2	管区 3	管区 4	管区 5	管区 6
$\kappa^{(seto)}$	0.9658	0.9658	0.8729	0.8729	0.8055	0.8055
$\kappa^{(0)}$	0.9643	0.9643	0.8687	0.8687	0.8143	0.8143
$\kappa_{*0.949}^{(1)}$	0.9631	0.9631	0.8717	0.8717	0.8171	0.8171

それぞれの地域において平均対応時間が平均化されると解釈することもできる。

表 6 は、重み付き管区 $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ を適用したとき、重みなしの管区 $\kappa^{(0)}$ を適用した場合より平均対応時間が短縮する人口と増加する人口を示している。これを見ると、管区 1, 2 では多くの場合平均対応時間が増加し、管区 3, 4, 5, 6 では短縮する。このモデルでは、全体で 4,749 人の平均対応時間が短縮するという結果が得られる。

表 7 は、それぞれの管区において発生した需要が、第一優先順位の救急車に割当てられる確率である。ただし、表 7 における管区 $\kappa^{(0)}$, $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ の管区番号は、それぞれ管区 $\kappa^{(0)}$, $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ における管区番号であり、瀬戸市の管区に基準化されたものではない。また、管区 1, 2 において、第一優先車両は本署に配備されている 2 台の救急車の両方とする。これを見ると、重みなしの管区 $\kappa^{(0)}$ を適用した場合、瀬戸市の管区と比較して第一優先順位の救急車に割当てられる割合が 0.0063 だけ増加している。平成 15 年の総発生件数が 4,274 であることから、 $4,275 \times 0.0063 = 26.9672$ となり、重みなしの管区 $\kappa^{(0)}$ を適用することは、第一優先順位の救急車に割当てられる人数を約 27 人増加させる可能性を持つ。重み付き管区 $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ を適用した場合は、瀬戸市の管区と比較して第一優先順位の救急車に割当てられる割合が 0.0155 だけ増加している。平成 15 年の総発生件数が 4,274 であることから、 $4,275 \times 0.0155 = 66.1424$ となり、重み付き管区 $\kappa_{*0.949}^{(1)}$ を適用することは、第一優先順位の救急車に割当てられる人数を約 66 人増加させる可能性を持つ。

重み付き管区を適用することは、重みなしの管区を適用する場合と比べて、第一優先順位の救急車に割当てられる件数を約 39 件ほど増加させる可能性を持つ。これにより、救急車システムが効率化され、平均対応時間が減少したと考えられる。

4 おわりに

本論文の研究では、異なる車両台数における緊急車両の適切な管区割り問題を考えた。はじめに、線分都市における数値計算実験により、車両台数の差異による効果が存在することを数値的に示した。ここではさらに、需要数の増減による適切な管区の変化についても数値的に示し、それに対する考察を与えることができた。

また、これらの実験結果の応用例として、愛知県瀬戸市の救急車の管区割り問題を考えた。瀬戸市では、救急車を2台、1台、1台と3箇所配備しているため、車両台数の異なる車両格納施設が存在する。これに対して、われわれは重み付き管区を定義することにより、救急車の車両台数の差異を考慮して管区の決定をおこなった。この管区を適用することにより、現在の瀬戸市の管区、また単純に近さだけによる管区割りで求めた管区よりも、小さな目的関数値を得ることが可能であることを示すことができた。

今回の研究では、数値計算実験結果から考察を得たが、より理論的に、数式等で最適な管区を得ることは今後の課題の一つである。また、最適な管区や重みを得るための効率的な探索方法を得ることができていないため、効率的な探索方法の構築も今後の課題の一つである。さらに、一般的に、利用率などから最適な境界、あるいは重みを得ることも今後の課題である。

参考文献

- [1] O. Berman and R. C. Larson, "Optimal 2-facility network districting in the presence of queueing," *Transportation Science* **19**, 261–277 (1985).
- [2] O. Berman, R. C. Larson and S. S. Chiu, "Optimal server location on a network operating as an $M/G/1$ queueing," *Operations Research* **33**, 746–770 (1985).
- [3] Luce Brotcorne, Gilbert Laporte and Frédéric Semet, "Ambulance location and relocation models," *European Journal of Operational Research* **147** (3), 451–463 (2003).
- [4] G. M. Carter, J. M. Chaiken and E. Ignall, "Response areas for two emergency units," *Operations Research*, **20** 571–594 (1972). 101–118 (1974).
- [5] S. L. Hakimi, "Optimum distribution of switching centers on a communications network and some related graph theoretic problems," *Operations Research* **13**, 462–475 (1965).
- [6] R. C. Larson, "A hypercube queueing model for facility location and redistricting in urban emergency services," *Computer & Operations Research*, **1** 67–95 (1974).
- [7] C. R. Toregas, R. Swain, C. S. ReVelle and L. Bergman, "The location of emergency service facilities," *Operations Research* **19**, 1363–1373 (1971).
- [8] Ronald W. Wolff, *STOCHASTIC MODELING AND THE THEORY OF QUEUES*, Prentice Hall, Inc., 1989.

- [9] 稲川敬介, 鈴木敦夫, “連続時間型マルコフ連鎖を用いた配置問題について,” 2002 年日本 OR 学会春季研究発表会 アブストラクト集 2-B-3, (2002) 160–161.
- [10] 稲川敬介, 鈴木敦夫, “愛知県 A 市における救急車の最適配備問題について,” 2003 年日本 OR 学会春季研究発表会 アブストラクト集 1-C-5, (2003) 50–51.
- [11] 稲川敬介, 鈴木敦夫, “愛知県瀬戸市における救急車の管区割り問題について,” 2004 年日本 OR 学会春季研究発表会 アブストラクト集 1-D-4, (2004) 82–83.
- [12] 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,” 2004 年日本 OR 学会和文論文誌 47, 25–39 (2004) .
- [13] 岡部篤行, 鈴木敦夫, 最適配置の数理, 朝倉書店, (1992).
- [14] 瀬戸市役所ホームページ, <http://www.city.seto.aichi.jp>, (2002 年から 2005 年にアクセス).
- [15] 瀬戸市消防本部ホームページ: <http://www.city.seto.aichi.jp/fire/>, (2002 年から 2005 年にアクセス).