

NANZAN-TR-2004-05

A Districting Problem for Emergency Service Systems: For
Ambulances in Seto City

Keisuke Inakawa and Atsuo Suzuki

November 2004

Technical Report of the Nanzan Academic Society
Mathematical Sciences and Information Engineering

愛知県瀬戸市における救急車の管区割り問題について

稲川敬介 南山大学大学院経営学研究科
鈴木敦夫* 南山大学数理情報学部

概要

本論では、愛知県瀬戸市における救急車の管区割り問題について議論する。管区とは、複数の救急車格納施設に対するサービス要求の割当優先順位によって、全体をいくつかに分割した区域である。ここで、サービス要求とは急病人の搬送要請などの救急車の呼出しのことであり、救急車格納施設とはたいていの場合消防署や病院などである。割当優先順位とはサービス要求に対応する救急車を決定するための規則である。われわれは、瀬戸市の現状について紹介し、回帰分析などの結果から、平均移動時間最小化を目的とする線形計画法として定式化する。また、それによって得た管区の性能評価をおこなう。そのあと、重複配備の効果を考慮するため、重み付きの管区を考える。性能評価により最も適切な重みを求め、これを妥当な管区として提案する。

1 はじめに

本研究では、事例研究として、愛知県瀬戸市の救急車の管区割り問題の最適化をおこなう。管区とは、複数の救急車格納施設に対するサービス要求の割当優先順位によって、全体をいくつかに分割した区域である。ここで、救急車格納施設とはたいていの場合消防署や病院などであり、サービス要求とは急病人の搬送要請などの救急車の呼出しのことである。割当優先順位とはサービス要求に対応する救急車を決定するための規則である。多くの場合、割当優先順位はサービス要求発生現場と格納施設との近さなどにより決定される。それぞれの管区は固有の割当優先順位を持っており、不適切な管区は救急車システムの効率化を妨げる要因の一つとなる。しかも、救急車格納施設の配置場所の変更には、格納施設の設立や機材の移動などに多大な費用を必要とするが、管区の修正にはそのような多大な費用を必要としない。よって、管区の修正は最も容易なシステム改善案の一つとも言える。

瀬戸市の救急車システムでは、瀬戸市全体を6つの管区に分割している。これらは、これまでの経験と町の成り立ちからしだいに決定されてきたものだという。よって、この管区が必ずしも妥当なものであるとは限らない。われわれは、数理的な手法を用いて、瀬戸市全体を適切な管区として分割することを考える。この問題を管区割り問題とする。本論文では、総移動時間最小化を目的として、それぞれの需要点(町丁目単位)を各管区に割り当てるといった単純な線形計画法によって、この管区を決定する。

また、管区を作成したとき、その管区がどのような結果をもたらすのかを知ることは難しい。しかしながら、単に数理的に管区を決定しただけでは、実際にそれを使用する消防署員から見ると、新しい管区を採用することが本当に正しいことなのか信用する根拠に乏しい。

*本研究は、科学研究費補助金基盤研究(A) 16201035 ならびに南山大学パツヘ研究奨励金 I - A - 2 の援助を受けた。

そこでわれわれは、求めた管区の性能評価として連続時間型有限マルコフ連鎖を適用した緊急車両のモデル [8] を用いて、それぞれの管区における平均到着時間を求め、これを最小にする管区を最も適切な管区として瀬戸市に提案する。ここで、平均到着時間とは、救急車の呼出し (サービス要求) である住民からの電話を受けつけたとき (覚知時刻) から救急車がサービス要求の発生現場に到着する (現場到着時刻) までの平均移動時間である。

さらに、2004 年 3 月 瀬戸市には、トンネルが新設された。これにともない、適正な管区も変化することが予想される。これに対してもわれわれは、トンネルの効果を予測し、新設されるトンネルに対応する管区を提案する。

2 救急車に関する過去の研究

救急車に関する過去の研究は、大まかに二つの種類に分類することができる。一つは決定的な問題であり、他方は確率的な問題である。決定的な問題は、カバーリング問題として救急車の配置場所を決定することが多い。決定的な問題の中には、推定した確率を用いてカバーリングをおこない、できる限り不確実性を考慮しようとするものもあるが、配置場所が決定する前に確率を推定することは非常に困難である。一方、確率的な問題の多くは、確率過程を用いて、厳密なモデル化から確率を導出する。しかしながら多くの場合、配置場所は所与である必要がある。

Toregas et al. [10] は、はじめて救急車の問題にカバーリングを用い (LSCM)、すべての領域を被覆するという制約の下で救急車の台数を最小化した。このモデルの大きな欠点は、ひとたび救急車が出動したとき、その配置が適切であることやすべての需要点を被覆することを保障しないということである。Mark S. Daskin, Edmund H. Stern[4] では、整数計画法であるカバーリング問題を線形計画法に緩和したとき、階層的な目的関数を用いることによって整数解を得やすくすることができるとしている。このときの第一目的は救急車の台数最小化であり、第二目的は複数被覆領域の最大化である。需要点にとって、複数の救急車に被覆されることは、短時間で救急車が到着する可能性を増やすことになる。

このことから、Mark S. Daskin[3] は期待被覆率最大化問題 (MEXCLP) を提案した。このモデルにおいて、各救急車はビジー割合と呼ばれる等しい確率 q を持っている。この所与の確率は救急車に対応できない確率であり、それぞれの救急車間において独立と仮定している。その後、ReVelle and Hogan[9] は等確率という制約を除き、配置場所 i におけるビジー割合 q_i を定義した。しかしながら、同論文において、 q_i はモデルの出力であり前もって知ることはできないとして、 q_i の推定の難しさを指摘している。

これらのモデルで用いられている確率は、救急車間の相互協力などの過程を全く無視しているが、救急車の問題は以下のような不確実性を含んでいる。

- (1) サービス要求がいつどこで発生するかわからないという、発生時刻と発生場所の不確実性。
- (2) 利用可能な (アイドル) 状態と利用不可能な (ビジー) 状態があるという、救急車の利用状態の不確実性。
- (3) あるサービス要求が発生したとき、利用可能な状態にある救急車の中でその発生場所に最も近い救急車がこのサービス要求に対応するという、サービス要求に対する割当

ての不確実性．

- (4) 様々な場所から発生したサービス要求を，それぞれの場所の救急車が対応することによって生み出されるサービス時間の不確実性．

不確実性の項目 (2) は，あるサービス要求をサービス中である緊急車両は，その間他のサービス要求に対応できないという，混雑のために起こる．また，不確実性の項目 (3) は，それぞれの緊急車両が独立に稼動するのではなく，相互に協力して全体のサービス要求に対応することを述べている．

これらの不確実性をモデルに組み入れるため，Carter et al. [6] は，はじめて救急車の問題を確率過程として扱い，連続時間型有限マルコフ連鎖を用いて十分に定義された確率を用いた．彼らは救急車が2台の問題に対して，ある配置が与えられたとき，それぞれの救急車に第一の優先順位で割り当てられる需要の領域を求めた．その後，Larson [7] は待ち行列理論の超立方体法を用い，12台までの救急車が相互協力をして，それぞれの確率を求めることに成功している．しかしながら，これらのモデルではサービス率がすべて等しいとしてあり，地理的な情報は組み入れられていなかった．Berman et al. [2] は，救急車が1台の問題に対し，Pollazek-Khintchine の公式 [11] を用いて，地理情報を含めた厳密な確率と，1台の救急車の最適な配置場所を求めるアルゴリズムを提案した．これは，厳密な確率を用いて平均到着時間を最小とする配置場所を求めるので理想的なモデルであるが，2台以上のモデルへの応用は難しい．稲川，鈴木 [8] では，救急車の配置を与えられたとき，連続時間型有限マルコフ連鎖を用い，地理情報を組み入れた平均到着時間を求めている．ただし，厳密な確率を定義するための計算量の多さから，救急車が4台までの結果しか求められていない．

Brotcorne et al. [5] によれば，救急車を事故現場に送り診療行為にいたるまでには4つの段階を必要とする．それは，(i) 事故の発見 (覚知)，(ii) サービス要求の選別と審査，(iii) 救急車の割り当て，(iv) 救急医療士による診療行為，の4つである．ここで，(ii) の選別は，いくつかの北アメリカの都市では，サービス要求を基本的救命処置 (BLS) と高度救命処置 (ALS) の2種類に区別しているために起こる．その都市では，訓練をつんだ消防士に BLS を，救命士には ALS を割り当てるとしている．ただし，本論文でわれわれが興味を持つ，愛知県瀬戸市ではこのような基準は設けていない．本論の主題である管区の作成は，(iii) 救急車の割り当ての適正化に当たる．

愛知県瀬戸市では，救急車の配置場所を変更するほどの予算は設けておらず，管区の適正化のみを求めている．しかしながら，過去の研究の多くは，救急車の配置を決定することに焦点を当てているため，管区の決定という過去の研究はわれわれの知る限りされていない．ただし，Carter et al. [6] では，2台の救急車に対してそれぞれが対応すべき境界を求めているので，管区割り問題は，この境界問題の拡張であるとも考えられるかもしれない．Carter et al. [6] のモデルでは救急車が2台であるが，瀬戸市では4台の救急車を保有している．そこでわれわれは，各需要点とそれぞれの救急車までの移動距離を最小化するように管区を定め，その管区を稲川，鈴木 [8] のモデルを用いて性能評価する．

さらに，瀬戸市では本署に2台の救急車が配備されている．そこで重複配備の効果を特定するため，移動費用行列に重みを付け，重み付きの管区を定義する．重み付き管区に対していくつかの重みを用いて性能評価をおこなうことにより，適切な重み付けを決定する．

3 瀬戸市の現状について

3.1 管区について

愛知県瀬戸市は西側に都市部，東側に山間部を持ち，東西に 12.8km 南北に 13.6km と広がっている．平成 16 年 6 月現在，同市には 49,312 世帯，132,101 人が暮らしている．平成 15 年のサービス要求発生(救急出動)件数は 4,275 件であり，その件数は年々増加している．図 3 は過去 11 年間の発生件数を折れ線グラフで示したものである．瀬戸市における平成 4 年の人口は 127,454 人であり，同年の発生件数は 2,316 件である．この間の人口増加率は 1.0365 ほどであるのに，発生件数の増加率は 1.8459 ときわめて高い．

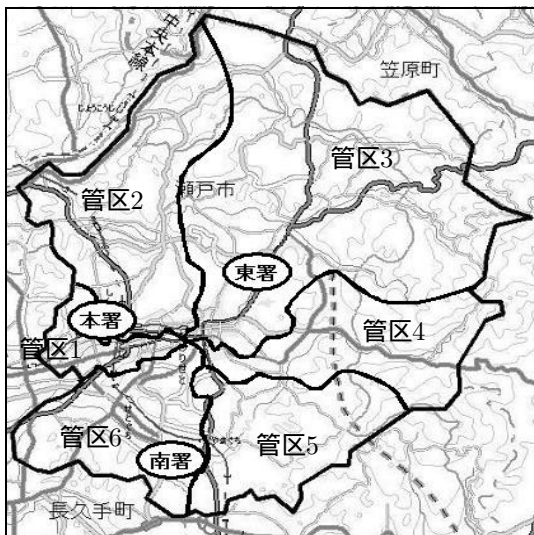


図 1: 瀬戸市

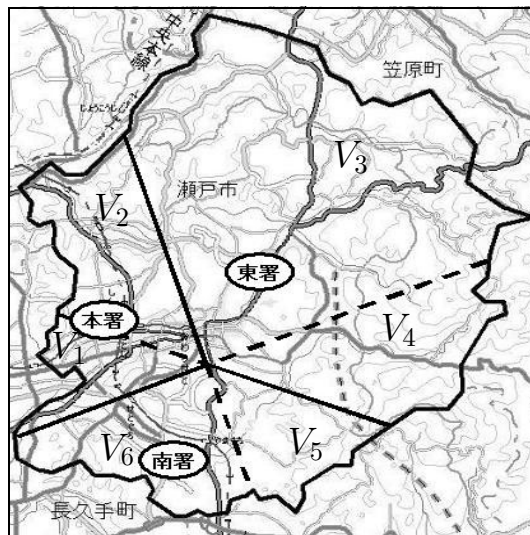


図 2: 瀬戸市のボロノイ図

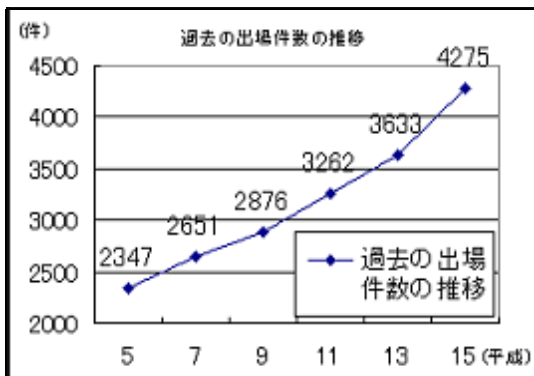


図 3: 過去の発生件数の推移

表 1: 管区とその優先順位

管区番号	割当優先順位		
管区 1	本署	南署	東署
管区 2	本署	東署	南署
管区 3	東署	本署	南署
管区 4	東署	南署	本署
管区 5	南署	東署	本署
管区 6	南署	本署	東署

瀬戸市では，4 台の救急車を三ヶ所に配備している．その内訳は，都市部中心にある本署に 2 台，山間部の多い東部の東署と 近年新興住宅地が増えつつある南部の南署にそれぞれ 1 台ずつ配備している(図 1 参照)．それぞれの救急車が待機する各施設を基本配備施設と呼ぶことにする．

瀬戸市の救急システムにおける一つのサービス要求に対する流れは以下のように書くことができる．

- (待機) サービス要求が発生するまで，基本配備施設で待機する．
- (覚知) サービス要求の発生を受ける．
- (出場) 発生したサービス要求に対応する救急車を決定し，現場にむかわせる．
- (現着) 発生現場に到着，応急処置，病院などへの搬送必要性の選別．
- (搬送) 搬送必要性の選別で必要があると判断された場合は病院への搬送をおこなう．
- (帰署) 基本配備施設に戻る．

ここで，(待機) の待機中には訓練やオフィスワークをおこなっている．(出場) のサービス要求に対応する救急車の決定には瀬戸市の管区を用いる．このとき，もしすべての救急車が利用可能でないならば，協定により近隣の自治体に応援を頼んで対応してもらう．(帰署) の帰署では，一つのサービス終了後には，基本的には一旦署に戻ってから次の要求に対応する．これは，救急車内の清掃や備品の補充などのためである．ただし，状況により帰署途中にそのまま次のサービス要求に対応することもある．

(出場) の時，サービス要求に対応する救急車の決定に用いる管区は，瀬戸市全体を6つの領域に分割している(図1参照)．それぞれの領域は各署に対する固有の割当優先順位を持っている．それぞれの管区番号とその割当優先順位の対応表は表1に示してある．

たとえば，管区1でサービス要求が発生したときはじめに第一優先順位である本署の救急車が利用可能かどうかを問い合わせる．もし本署の救急車がすべて利用可能でないならば，次に第二優先順位である東署の救急車が利用可能かどうかを問い合わせる．もし東署の救急車がすべて利用可能でないならば，次に第三優先順位である南署の救急車が利用可能かどうかを問い合わせる．もし南署の救急車がすべて利用可能でないならば，そのときは瀬戸市のすべての救急車が利用可能でないので，近隣の自治体に応援を要請して，このサービス要求に対応してもらう．

割当優先順位は各署の順列であり，瀬戸市の管区の数6は3つある署の順列の総数に対応している．これは，二次のボロノイ図の考え方と同じである．そこで，瀬戸市全体に各署を核とするユークリッド距離の二次のボロノイ図は図2となる．それぞれ $V_j, j = 1, \dots, 6$ は管区 $j, j = 1, \dots, 6$ に対応する二次のボロノイ領域である．太線は一次のボロノイ領域を表している．4節では，“要求発生時点に利用可能な救急車の中で，発生現場に最も近い署の救急車がこれに対応する”というサービス規律を定義して管区割りをおこなう．このときわれわれがおこなう計算は，離散的な需要点を持つ二次のネットワークボロノイ図を描くことと同値である．また，管区を作成することは，瀬戸市の救急車の割当を決定することに等しい．

図1の瀬戸市の管区は，実際に距離などを計測して作られたものではなく，市の成り立ちに沿いながら，長年の経験を用いて作られたものである．よって，現在の管区が適正な管区であるかどうかはわからない．より妥当な管区がある場合は，これを修正するべきである．この修正に必要な材料を得るため，瀬戸市の様々な現状を分析する．

3.2 瀬戸市の現状分析

われわれは，平成13年から15年の瀬戸市消防本部救急データをもとに，瀬戸市の救急車システムの現状を見る．サービス要求が発生してから，救急車がサービス要求の発生現場に到着する(現場到着時刻)までの総時間を総対応時間と呼び，総対応時間のうち移動に必要な時間を単に対応時間と呼ぶことにする．

表 2: 3年間の対応時間(全, 1, 全)

総対応時間	管区 1	管区 2	管区 3	管区 4	管区 5	管区 6	総計	頻度	累積頻度
0.5	1	12	41	0	1	6	61	0.006	0.006
1.5	1	40	20	0	1	8	70	0.006	0.012
2.5	4	198	97	0	2	68	369	0.034	0.045
3.5	66	564	239	0	30	261	1160	0.105	0.151
4.5	337	632	443	1	107	558	2078	0.189	0.340
5.5	555	454	522	53	167	727	2478	0.225	0.565
6.5	365	304	410	122	178	670	2049	0.186	0.751
7.5	180	227	216	89	122	369	1203	0.109	0.861
8.5	51	110	119	38	72	189	579	0.053	0.913
9.5	22	65	83	16	54	136	376	0.034	0.948
10分以上	20	145	160	29	61	162	577	0.052	1.000
総計	1602	2751	2350	348	795	3154	11000	1.0	—
平均	5.38	4.91	5.50	6.93	6.33	5.67	5.49	—	—
平均(移動)	4.35	3.89	4.39	5.78	5.10	4.54	4.40	—	—

表 2 は、平成 13 年から 15 年の間にそれぞれの管区で発生したサービス要求の総対応時間別の発生件数を示したものである。この 3 年間で瀬戸市が 5 分以内に対応できた割合は 0.340 である。また、Brotcorne et.al. [5] によれば、United States Emergency Medical Services Act では全体の 95% に対して 10 分以内に対応するという基準を設けている。瀬戸市で 10 分以内に対応できた割合は 94.8% なので、この基準はほぼ達成できていると考えられる。管区別に見ると、管区 4 と 5 では発生件数が比較的少ない。また、総対応時間も 6 分以上となっている。逆に、管区 2, 3, 6 には消防署があるので、素早い対応も可能である。

図 4 は、平成 15 年の時間帯別発生件数である。これを見ると、発生件数は時間帯によって大きく差があることがわかる。深夜の発生件数は少なく、朝方から昼までの時間帯は比較的発生件数が多い。管区の性能評価をおこなうときは、混雑の影響を考えるため、このような発生数の違いは混雑度を間延びさせてしまう。そこでわれわれは、一日を二つの時間帯に分割する。われわれは、発生件数が時間帯における発生件数が 500 をこえる時間帯 8:00 - 21:00 を昼の時間帯とし、それ以外を夜の時間帯とする。

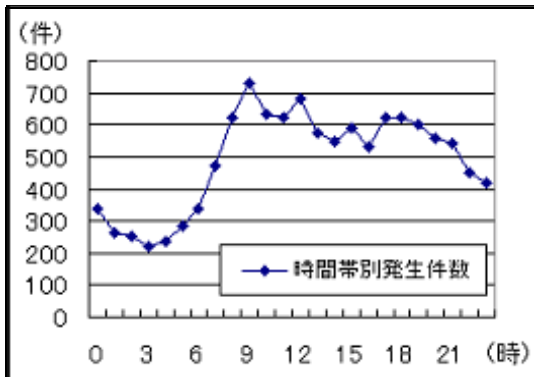


図 4: 時間帯別の出場件数

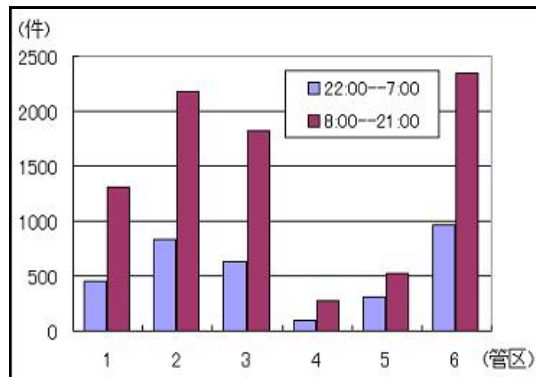


図 5: 管区ごとの発生件数

表 3: 各管区における平成 15 年の対応状況 (H.15, 1, 1)

管区	人口	発生件数	呼出回数	第 1 優先	第 2 優先	第 3 優先	第 4 優先
1	17,199	421	2.45	<u>324</u>	<u>87</u>	7	3
2	40,336	685	1.70	<u>551</u>	<u>108</u>	21	5
3	26,819	597	2.23	528	<u>51</u>	<u>15</u>	3
4	2,671	83	3.11	76	6	<u>1</u>	<u>0</u>
5	5,951	190	3.19	167	22	<u>0</u>	<u>1</u>
6	39,125	772	1.97	657	<u>85</u>	<u>29</u>	1
総計	132,101	2748	2.08	2303	359	73	13
割合	—	—	—	0.838	0.131	0.027	0.005

われわれは時間帯 8:00~21:00 と 22:00~7:00 を区別して考えるとし、各管区における発生件数は、図 5 で図示してある。平成 13 年から 3 年間の発生件数が最も多いのは管区 6 である。管区 2 もほぼ同数発生している。3 年間の発生件数における管区ごとの差の多くは、管区の人口の差によるものである。各管区の人口は表 3 に示してある。ここで、発生件数は平成 15 年のサービス要求発生件数であり、年呼出回数は平成 15 年における 100 人当たりの呼出回数である。この人口は、瀬戸市役所ホームページ [12] による平成 16 年 6 月 1 日のデータである。管区 1, 2, 6 は都市部であり、瀬戸市内では比較的人口の多い地域である。

平成 15 年の 8:00 から 15:00 の間に瀬戸市内で発生したサービス要求の中で、各管区がそれぞれの署の優先順位に対応されたサービス要求の件数は、表 3 に示してある。ここで、下線は救急車が 2 台配備されている本署を表している。瀬戸市ではおよそ 0.162 の割合でサービス要求がそれ以前のサービス要求のサービス時間に重複して発生していることがわかる。

本署では、2 台の救急車が同じ場所に配備されているので、管区 1, 2 においては第 1 優先でも第 2 優先でも移動距離は等しい。各署に対する実質的な優先順位対応は、全体で第 1 優先順位車両が 0.9090、第 2 優先順位車両が 0.0859、第 3 優先順位車両が 0.0051 である。

さらに、時間帯ごとに車両の移動速度に変化があるのかを検証するため、平成 13 年から 15 年のデータを時間帯ごとに分類し、各時間帯ごとの平均速度を求めた。図 6 はそれを折れ線グラフにした図である。これを見ると午前 4 時が特別遅く、それ以外の時間帯にそれほど多くの差は出ていない。4 時の平均速度が低いのは管区 1 と 2 であり、都市部の朝方のため、十分注意して走行しているからかもしれない。全体の傾向として、比較的昼の時間帯の方が速度が速いことがわかる。

もし各時間帯の平均速度に大きく差があった場合、たとえば昼の管区と夜の管区というように、管区もその時間帯にあったものを使用すべきであるが、この図よりそのような分割をする必要はないことがわかる。ただし、その速度には各管区ごとにばらつきがある。都市部の管区 1 と 2 はほぼ同じ速度であるが、それ以外の管区とは明らかに異なっている。

各領域が各署の救急車からサービスを受けたときのサービス時間とそのうちの移動時間を表 4 に示している。これを見ると、管区 1, 2 に本署が対応した場合が、それ以外の対応よりも 10 分ほどサービス時間が短い。移動時間を見ても最も短い。これは、都市部である管区 1, 2 では、比較的本署の近くでサービス要求が発生することが多く、また、中心部に大きな病院があるため、患者の搬送にも多くの時間を必要としないためかもしれない。

これらをふまえて、われわれは瀬戸市内の移動にかかる時間の回帰分析をおこなう。瀬戸

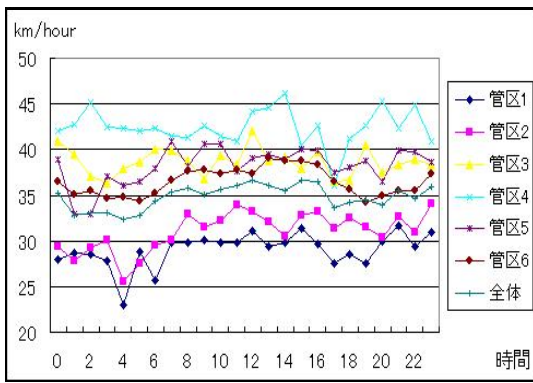


図 6: 時間帯別の救急車の速度

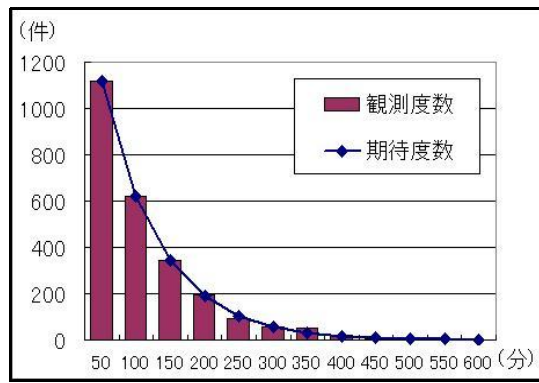


図 7: 平成 15 年の発生時間間隔 (8-21)

市には都市部と山間部があるので、瀬戸市全体を 3 つの領域に分割し、各署から各領域への移動時間をそのときの移動距離によって回帰する．ここで、3 つの領域とは、管区 1 と 2、管区 3 と 4、管区 5 と 6 の 3 つである．ただし、切片は 0 に固定し、単純に一次式で回帰する．回帰式を $Y = vX$ としたとき、回帰係数 v を以下の式で求める．

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}.$$

ここで、 x_i は平成 13 年から 15 年の各救急車の移動距離データであり、 y_i はそれに対応する移動時間データである．

表 4: 各署における平均サービス時間と移動時間 (H.15, 1, 1)

平均サービス時間					平均移動時間				
管区	本署	東署	南署	総計	管区	本署	東署	南署	総計
1,2	46.09	59.17	68.67	46.62	1,2	3.79	7.92	8.67	3.93
3,4	52.82	56.01	71.78	55.90	3,4	8.19	4.30	8.67	4.74
5,6	53.88	61.35	59.31	58.71	5,6	7.76	7.83	4.38	4.86
総計	47.17	56.31	59.58	53.15	総計	4.39	4.56	4.48	4.46

表 5: 回帰係数一覧

署	管区	回帰係数	署	管区	回帰係数	署	管区	回帰係数
本署	1,2	1.7774	東署	1,2	1.3913	南署	1,2	1.5416
本署	3,4	1.5372	東署	3,4	1.4742	南署	3,4	1.4157
本署	5,6	1.7937	東署	5,6	1.3783	南署	5,6	1.5975

引き続きサービス要求の発生時間の間隔は図 7 のようになっている．ここでは平均 84.43 を用いた指数分布も同時に示してある．これを見ると発声時間間隔は指数分布にしたがうであろうことがわかる．実際、適合度検定をおこなうと、 χ^2 統計量、修正 χ^2 統計量、尤度比統計量はそれぞれ

$$\sum_{i=1}^{12} \frac{(n_i - np_i)}{np_i} = 13.48, \quad \sum_{i=1}^{12} \frac{(n_i - np_i)}{n_i} = 13.63, \quad 2 \sum_{i=1}^{12} n_i \log \frac{(n_i)}{np_i} = 16.96,$$

となる．一方，有意水準 0.05 に対する棄却限界は $\chi_{11,0.05}^2 = 19.68$ であり，いずれの値も棄却限界に達しないので，指数分布であることを否定しない．

4 管区の作成

管区の決定には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．われわれは瀬戸市の管区割り問題を以下のように定式化する．

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

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 町丁目までの距離または到着時間であり， x_{kj} は k 町丁目を管区番号 j に定める決定変数である．

x_{kj} は 0 か 1 のどちらかである必要があるが，この問題では $\{x_{jk} \in \{0,1\}\}$ という制約を加えなくても，計算結果は必ず 0 か 1 となる制約式 $\sum_j x_{kj} = 1$ と α, β, γ の関係から， x_{jk} は平均到着時間を最小とする管区番号 k でのみ値 1 を取る．

5 管区作成計算結果

はじめに，瀬戸市で実際に使用されている管区を $j^{(1)}$ とする．次にゼンリン電子地図帳 Z6 で各署からそれぞれの地区（町丁目単位）の中心地までの最短距離行列 $\{d_{ij}^{(2)}\}$ を計測し，移動距離最小化となる管区 $j^{(2)}$ を作成する．さらにわれわれは平成 13 年から 15 年の瀬戸市消防本部救急データを用い，各署からそれぞれの地区までの 3 年間の平均到着時間を求める．また，データ数の少ない（5 件未満）地区に対しては，3 年分のデータを用いた回帰分析と最短距離行列 $\{d_{ij}^{(2)}\}$ を用いて平均到着時間の推定をおこなう．回帰分析は，都市部と山間部では移動時間に差があるため，各署から管区 1, 2，管区 3, 4，管区 5, 6 への出場をそれぞれ区別しておこない，簡単のためすべて原点を通る一次関数とする．これらを併せた平均到着時間行列を $d^{(3)}$ とする． $d^{(3)}$ の総平均到着時間最小化により得られる管区を $j^{(3)}$ とする．最後に，トンネルの効果を考慮するため，トンネルの効果が強くあらわれると思われる管区 1, 2, 5, 6 の各地区から本署と南署までの最短距離を同じくゼンリン電子地図帳 Z6 により求め， $j^{(3)}$ と同様に，トンネルを考慮した平均到着時間行列 $d^{(T)}$ を作成する． $d^{(T)}$ の総平均到着時間最小化により得られる管区を $j^{(6)}$ とする．

また，すべてのモデルにおいて α, β, γ はそれぞれ100, 10, 1とし，町丁目の数は364箇所 ($k = 1, \dots, 364$)である．計算には数理計画ソフト What's BEST! を用いた．計算時間は2秒ほどである．用いたコンピュータは，OSがMicrosoft Windows XP, CPU Pentium (R) 4, クロック 2.80 GHz, メモリ 512 MBである．図8から10は，それぞれのモデルの計算結果の概略である．

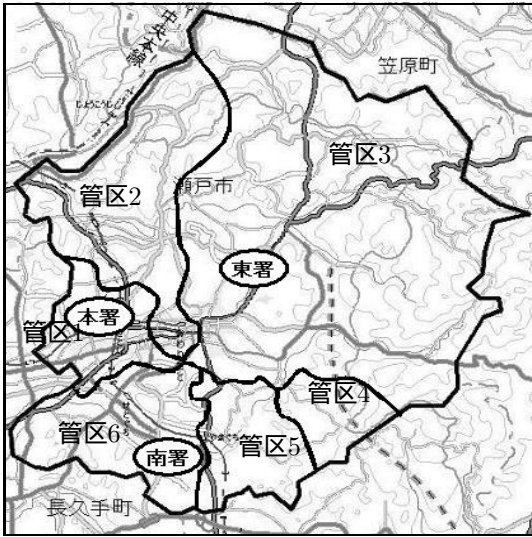


図 8: 距離のみで計算した管区 $j^{(2)}$

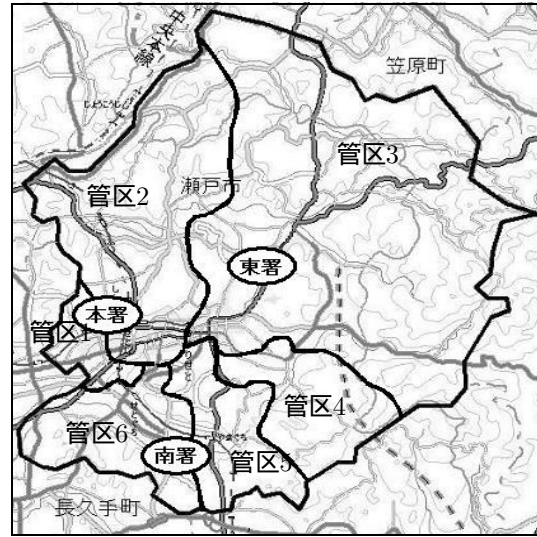


図 9: データより計算した管区 $j^{(3)}$

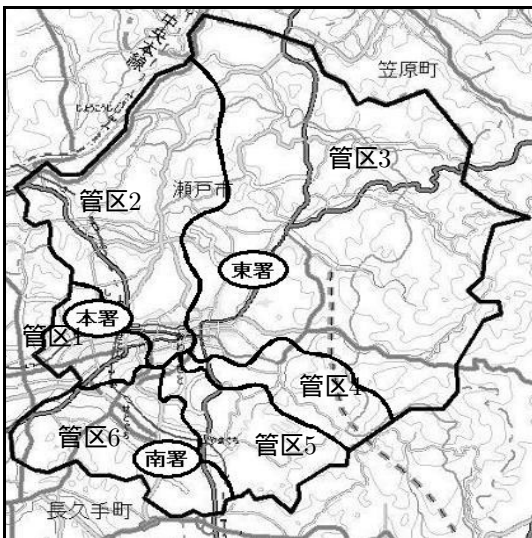


図 10: トンネルを考慮した管区 $j^{(6)}$

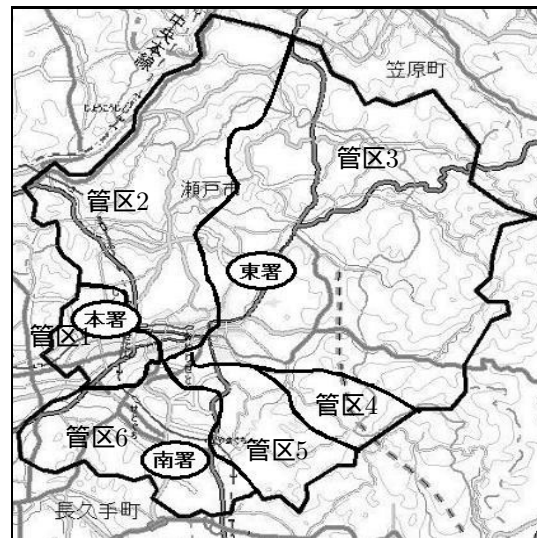


図 11: 車両の重み付き管区 $j^{(8)}$ [1.025]

それぞれの図を視覚的に比較すると，実際に瀬戸市で使用されている管区 $j^{(1)}$ が最も二次のボロノイ図に準じていることがわかる．これは，人間の経験が道路ネットワークという複雑な地理情報を捕えられず，地図上でユークリッド距離を考えてしまった結果かもしれない．

$j^{(1)}$ と $j^{(3)}$ を視覚的に比較すると，大きく異なる点が二つある．一つは，管区1と管区2の境界線であり， $j^{(3)}$ の境界線は，管区2に上から押し潰されたようになっている．押し潰された領域は，瀬戸市内では非常に栄えている部分であるため，サービス要求の発生も多い部分の一つである．しかしながら，本署には2台の救急車が配備されているため，この境界

はあまり重視されていないという。このことから、 $j^{(1)}$ の管区 1 と管区 2 の境界線は深く考慮されて定められたものではないかもしれない。いま一つは、管区 3 と管区 4 の境界線と管区 4 と管区 5 の境界線である。この付近は山間部が多い地区である。 $j^{(3)}$ では管区 3 の領域が広がり、管区 4 と管区 5 の領域が縮小しているのがわかる。

6 管区の性能評価

この結果が妥当であることを示すため、稲川、鈴木 [8] のモデルを用い、連続時間型マルコフ連鎖を適用して管区の性能評価をおこなう性能評価には、

- 救急車の平均現場到着時間 r ,
- ブロッキング率 P_b ,

の二つの指標を用いる。ここで、ブロッキング率 P_b とは、すべての救急車がビジー状態である確率である。稲川、鈴木 [8] のモデルでは、ブロッキング率が大きい場合の平均現場到着時間は妥当なものではない。よって、 $P_b \geq .01$ であるときの平均現場到着時間は計算をおこなわない。また、性能評価に用いたデータは、平成 15 年一年間の 8:00 から 22:00 までの出場件数、サービス要求への平均対応時間、各平均到着時間行列 $d^{(3)}$ 、 $d^{(T)}$ である。計算時間は、およそ 3 秒ほどである。

計算結果は表 7 にまとめてある。モデル 1, 2, 3 の性能評価には $j^{(3)}$ の管区割りで求めた到着時間行列 $d^{(3)}$ を用い、モデル 4, 5, 6 にはトンネルの効果を組み入れた到着時間行列 $d^{(T)}$ を用いている。

モデル 1 から 3 を比べると、モデル 1(瀬戸市で使用されている管区) が平均到着時間とブロッキング率の両方においても最も悪い。瀬戸市の管区には修正する余地があるかもしれない。モデル 1 とモデル 3 との比較では、約 0.1081(6.49 秒) の差がある。よって、瀬戸市はほとんど費用をかけることなく、平均到着時間を全体で 6.5 秒ほど短縮できる可能性をもっている。

モデル 4 は、トンネルができた後も管区を修正せずに使用した場合である。また、モデル 5 は、トンネルができた後、最短道路距離 $d^{(2)}$ により管区を修正した場合である。モデル 6 とモデル 4 の間には約 0.1139(6.83 秒) の差がある。モデル 1 とモデル 4 の間の差は 0.0266(約 1.60 秒) であり、トンネルができることにより瀬戸市は管区を変更しなくても平均到着時間を 1.6 秒ほど短縮することができる。しかしながら、変更に対応して適切な管区に変更した場合、その効果はモデル 3 とモデル 6 の間の差であり、0.0324(約 1.94 秒) となる。

7 重複配備の効果

現在瀬戸市では、本署に 2 台の救急車が配備されている。しかしながら、これまでの管区の決定にはこの効果が取り入れられていない。そこで、本署までの到着時間とそれ以外の署までの到着時間に重みを付けて管区割りをおこなう。 $j^{(3)}$ の重みつき管区を $j^{(7)}[w]$ 、 $j^{(6)}$ の重みつき管区を $j^{(8)}[w]$ とする。ここで、 $[\]$ 内の w は本署までの距離に対する重みを表している。すなわち、本署から町丁目 k までの移動時間を $d_{1,k}$ 、本署以外の署 i から町丁目 k ま

表 6: 管区の説明一覧

管区	管区の説明
$j^{(1)}$	瀬戸市で実際に使用されている管区 .
$j^{(2)}$	最短道路距離で管区分け .
$j^{(3)}$	実際のデータから得た平均到着時間とモデル 2 の最短道路距離を用いて推定した平均到着時間をあわせて計算した管区 . このとき得られる各署からそれぞれの町丁目までの到着時間行列を $d^{(3)}$ とする .
$j^{(6)}$	モデル 4 にトンネルの効果を取り入れた管区 . このとき得られる各署からそれぞれの町丁目までの到着時間行列を $d^{(T)}$ とする .
$j^{(7)}$ [重み]	モデル 4 に重複配備の効果を取り入れた管区 . [] 内は救急車が 2 台配備されている本署に対する距離の重み .
$j^{(8)}$ [重み]	モデル 5 に重複配備の効果を取り入れた管区 . [] 内は救急車が 2 台配備されている本署に対する距離の重み .

表 7: 性能評価の計算結果

モデル	管区	$\{d_{ij}\}$	r	P_b	モデル	管区	$\{d_{ij}\}$	r	P_b
1	$j^{(1)}$	$d^{(3)}$	4.5317	0.0041	4	$j^{(1)}$	$d^{(T)}$	4.5051	0.0041
2	$j^{(1)}$	$d^{(3)}$	4.4710	0.0035	5	$j^{(2)}$	$d^{(T)}$	4.4412	0.0035
3	$j^{(1)}$	$d^{(3)}$	4.4236	0.0037	6	$j^{(6)}$	$d^{(T)}$	4.3912	0.0037

表 8: 重複配備の効果を考慮したモデル

管区 [重み]	$\{d_{ij}\}$	r	P_b	管区 [重み]	$\{d_{ij}\}$	r	P_b
$j^{(7)}$ [0.90]	$d^{(3)}$	4.5210	0.0042	$j^{(8)}$ [0.90]	$d^{(T)}$	4.4776	0.0042
$j^{(7)}$ [0.95]	$d^{(3)}$	4.4710	0.0040	$j^{(8)}$ [0.95]	$d^{(T)}$	4.4257	0.0040
$j^{(7)}$ [0.99]	$d^{(3)}$	4.4268	0.0037	$j^{(8)}$ [0.99]	$d^{(T)}$	4.3812	0.0036
$j^{(3)}$	$d^{(3)}$	4.4236	0.0037	$j^{(6)}$	$d^{(T)}$	4.3785	0.0036
$j^{(7)}$ [1.01]	$d^{(3)}$	4.4205	0.0037	$j^{(8)}$ [1.01]	$d^{(T)}$	4.3755	0.0036
$j^{(7)}$ [1.015]	$d^{(3)}$	4.4205	0.0037	$j^{(8)}$ [1.015]	$d^{(T)}$	4.3755	0.0036
$j^{(7)}$ [1.02]	$d^{(3)}$	4.4203	0.0037	$j^{(8)}$ [1.02]	$d^{(T)}$	<u>4.3752</u>	0.0036
$j^{(7)}$ [1.025]	$d^{(3)}$	<u>4.4202</u>	0.0037	$j^{(8)}$ [1.025]	$d^{(T)}$	<u>4.3752</u>	0.0036
$j^{(7)}$ [1.03]	$d^{(3)}$	4.4205	0.0037	$j^{(8)}$ [1.03]	$d^{(T)}$	4.3757	0.0036
$j^{(7)}$ [1.04]	$d^{(3)}$	4.4233	0.0036	$j^{(8)}$ [1.04]	$d^{(T)}$	4.3792	0.0035
$j^{(7)}$ [1.05]	$d^{(3)}$	4.4264	0.0036	$j^{(8)}$ [1.05]	$d^{(T)}$	4.3827	0.0035
$j^{(7)}$ [1.10]	$d^{(3)}$	4.4412	<u>0.0034</u>	$j^{(8)}$ [1.10]	$d^{(T)}$	4.3955	<u>0.0034</u>
$j^{(7)}$ [1.15]	$d^{(3)}$	4.4893	<u>0.0034</u>	$j^{(8)}$ [1.15]	$d^{(T)}$	4.4437	<u>0.0034</u>
$j^{(7)}$ [1.20]	$d^{(3)}$	4.5704	0.0035	$j^{(8)}$ [1.20]	$d^{(T)}$	4.5237	0.0035
$j^{(7)}$ [1.25]	$d^{(3)}$	4.6387	0.0035	$j^{(8)}$ [1.25]	$d^{(T)}$	4.6245	0.0035
$j^{(7)}$ [1.30]	$d^{(3)}$	4.8881	0.0036	$j^{(8)}$ [1.30]	$d^{(T)}$	4.8360	0.0036

での移動時間を $d_{i,k}$, ($i = 2, 3$) としたとき, 重み w を用いて平均到着時間行列を以下のように重み付けする.

$$\frac{d_{1,k}}{w} : \frac{d_{i,k}}{2-w}, \quad i = 2, 3.$$

これを用いて, いくつかの w について管区を計算する. また, これについても稲川, 鈴木 [8] のモデルを用いて性能評価をおこなう. ただし, 性能評価に用いる到着時間行列はモデル 3 と 4 と同じ, $d^{(3)}, d^{(T)}$ を使用する. この計算結果は, 表 8 に示してある.

この計算結果より, $j^{(7)}$ では, 平均到着時間において, 本署から任意の町丁目 k と それ以外の署から任意の町丁目 k の移動時間を $1.025 : 0.975$ とすることが最適であるとわかった. このとき平均到着時間は 4.4013 秒となり, 0.0035 秒だけ短くなる. また, 呼損率においては, $1.10 : 0.90$, あるいは $1.15 : 0.85$ とすることが最適であるとわかった. このときブロッキング率 $P_b = 0.0029$ を得る.

同じく, $j^{(8)}$ では, 平均到着時間において, 本署から任意の町丁目 k と それ以外の署から任意の町丁目 k の移動時間を $1.02 : 0.98$, あるいは $1.025 : 0.975$ とすることが最適であるとわかった. このとき平均到着時間は 4.3573 となり, 0.0033 秒だけ短くなる. また, 呼損率においては, $1.10 : 0.90$, あるいは $1.15 : 0.85$ とすることが最適であるとわかった. このときブロッキング率 $P_b = 0.0029$ を得る.

よって, この場合わずかであるが, 重複配備の効果を考慮するべきであるということがわかった. また, 平均到着時間より, 呼損率のほうが重複配備の効果に敏感であることがわかった.

最終的に, 瀬戸市では平均現場到着時間が第一目的であり, すべての計算において $P_b \leq 0.01$ であるということから, 管区 $j^{(7)}$ [1.025] が最も適切な管区であると結論付ける. また, トンネルができてからの場合は, 管区 $j^{(8)}$ [1.02], または $j^{(8)}$ [1.025] が最も適切な管区であると結論付ける.

8 おわりに

今回の研究では, 適正な管区を求め, またその性能評価をおこなうことができた. 結果, 瀬戸市が使用している管区より適切な管区が存在する可能性を確かめることができた. また, トンネルの新設という効果をモデル内に組み入れ, 新たな管区の提案をおこなうことができた. さらに, いくつかの管区の性能評価により, 重複配備の効果を取り入れた管区の適正化を計算することができた.

救急車に対する需要の割当て規則を適正化することによって, システムの効率化を図ることができるといことがわかった.

また, 重複配備の効果は, 平均現場到着時間よりもブロッキング率の方が敏感であるということも, 数値計算実験よりわかった.

参考文献

- [1] M. O. Ball, L. F. Lin , “ A reliability model applied to emergency sevice , ” *Opns. Res.* **41** , 18–36(1993).
- [2] O. Berman , R. C. Larson and S. S. Chiu, “Optimal Server Location on a Network Operating as an $M/G/1$ Queueing, ” *Opns. Res.* **33** , 746–770(1985).
- [3] M. S. Daskin , “Amaximum expected location model: Formulation, properties and heuristic solution , ” *Trans. Sci.* **7** , 48–70(1983).
- [4] Mark S. Daskin, Edmund H. Stern , “A Hierarchical Objective Set Covering Model for Emergency Medical Service Vehicle Deployment , ” *Transportation Sci.* **15** , 138–152(1981).
- [5] Luce Brotcorne, Gilbert Laporte, Ferédéric Semet , “Ambulance location and relocation models , ” *European Journal of Operational Research* **147** , 451–463 , (2003) .
- [6] Grace M. Carter, Jan M. Chaiken and Edward Igall , “Response Areas for Two Emergency Units , ” *Opns. Res.* **20** , 571–594(1972).
- [7] R. C. Larson , “Hypercube Queueing Model for Facility Location and Redistricting in Urban Emergency Service , ” *Comput. & Opns. Res.*, Vol. **1**, pp.67–95(1974).
- [8] 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 , 2004 (掲載予定) .
- [9] C. S. ReVelle, K. Hogan , “The maximum availability location problem , ” *Trans. Sci.* **23** , 192–200(1989).
- [10] C. R. Toregas, R. Swain, C. S. ReVelle, L. Bergman , “ The location of emergency service facilities , ” *Opns. Res.* **19** , 1363–1373(1971).
- [11] Ronald W. Wolff , “*STOCHASTIC MODELING AND THE THEORY OF QUEUES* , ” Prentice Hall, Inc. , 1989.
- [12] 瀬戸市役所ホームページ , <http://www.city.seto.aichi.jp> , 2004.

稲川敬介
南山大学大学院経営学研究科経営学専攻
〒466-8673 名古屋市昭和区山里町 18
E-mail: d02bb002@nanzan-u.ac.jp