

# 施設配置に基づく圏域策定に関するシミュレーションモデル

Simulation Models of Domain Division based on the Allocation of Urban Facilities

藤井 明\*・及川 清 昭\*

Akira FUJII and Kiyooki OIKAWA

## 1. はじめに

都市空間にいくつかの同種の施設が存在する場合に、その配置の特性を考慮しつつ、適切な圏域を各施設に割り当てるといった問題は、施設の効率的な活用を計る上で重要である。具体的な例でいうと、震災時に備えて設定された広域避難場所に対し、その避難区域を割り当てるといった問題である。(この避難区域の策定の問題は、以下に述べる各モデルのもつ意味を明らかにする上でわかりやすい例と思われるので、随時、引用する) 施設の形態としては、最も一般的に面的施設を考え、これを母領域、その他の部分を周辺領域と呼ぶ。

地域分析では、母領域が周辺領域のある地点に及ぼす影響力を計量する際に、距離に準拠した分布関数を設定する 경우가多いが、こうした事象に対する領域分割の代表的なものに Voronoi 分割がある。Voronoi 分割というのは、周辺領域内の各地点に対し、その最近隣の母領域を対応づける領域分割である。この手法において分割の決定因となるのは、各地点から母領域の周縁部に至る距離のみであり、母領域自体の絶対的な大きさというものは関与せず捨象されている。Voronoi 分割を都市的事象に適用する際に常に問題となるのはこの点で、現実的な都市施設には必ず限定された容量というものがある。先の避難場所の例でいうと、避難区域は空地の規模に応じて設定されるべきである。

本報告は、母領域の容量、あるいは周辺領域の密度分布をも考慮に入れた幾何学的領域モデルのいくつかを提示し、Voronoi 分割の改良モデルとしての性能を計算幾何学的にシミュレートしたものである。また、現実への適用事例としてこれらのモデルを東京都 23 区内の広域避難場所に適用し、モデルとしての有効性を検証している。

## 2. 領域分割モデル

平面上に分布する  $n$  個の母領域  $D_i (i=1,2,\dots,n, D_i \cap D_j = \phi, i,j \in n)$  に対し、周辺領域内の点  $p$  と母領域  $D_i$  との距離を  $d(p, D_i) = \inf\{d(p, c) \mid c \in D_i\}$  とする。このとき  $r \geq 0$  に対し、 $C' = \{c' \mid d(c', D_i) = r, c' \in D_i\}$  なる平行曲線を考え、 $C'$  と  $D_i$  との間の領域  $B_i(r)$  を距離  $r$  の帯領域と呼ぶ。(なお、以下の説明図中の母領域や密度分布に特別な意味はない。また各母領域の容量は、周辺領域の重みの総和をその面積比で配分してある)

2.1 モデル I  
Voronoi 分割は周辺領域内の各地点に対し、最近隣の母領域を対応づけるが、これは最適化の観点からみると、周辺領域から母領域に至る距離の総和を最小にする割り当てになっている。距離の総和が最小ということは、すなわち、平均距離を最小にするということと同意である。この平均距離を最小にするという条件を保持しつつ、各母領域に固有の容量を設定した場合に圏域構成がどのように変化するかというのを調べるのがモデル I である。これは OR でいうところの割り当て問題に相当する。モデルとしては周辺領域の密度を均質とする場合と重みづけた場合があるが、一般的に重みづけた場合についての定式化を行うと次のようになる。

### 2.1 モデル I

周辺領域の各地点  $g_j (j=1,2,\dots,m)$  に対し、その重みを  $W_j$ 、母領域  $D_i$  との距離を  $d_{ij}$ 、また母領域  $D_i$  の容量を  $Y_i$  とすると、

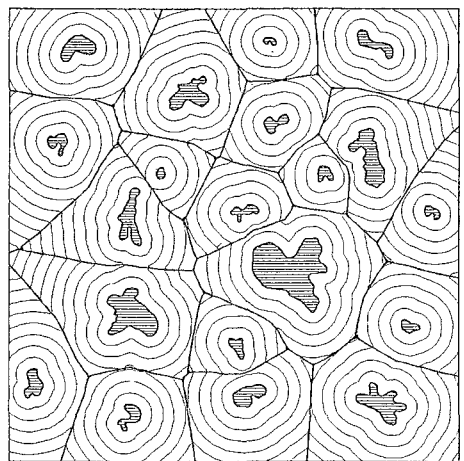


図-1 母領域の Voronoi 分割図

\*東京大学生産技術研究所 第5部

$$\text{目的関数: } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_j \cdot X_{ij} \cdot d_{ij}$$

$$\text{制約条件: } \sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, X_{ij} = X_{ij}^2$$

$$\sum_{j=1}^m W_j \cdot X_{ij} \leq Y_i \quad (i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m)$$

となり、これを最小化して、 $X=(X_{ij})$  なる割り当て行列を求めることである。この解法はいくつか知られているが、ここではいわゆる行列変形法で解いてある。実際に図上で領域分割を行うにあたっては、周辺領域をグリッド化し、これを  $g_i$  としている。こうすることにより、従来の点的な解法を面的なものにも適用することが可能となる。(図-2は均質な例)

母領域と周辺領域との平均距離を最小にすることは、避難場所の例でいうと、平均避難距離を最小化することで、平等の原則に則った圏域策定の仕方といえる。

2.2 モデル II

Voronoi 分割を母領域の平行曲線に着目してみると、図-1に示されているように、その境界線は平行曲線群の特異点の軌跡になっている。この平行曲線群を描く操作を平行線と母領域との  $r$  の時間的変化としてとらえてみる。時間  $t$  と共に距離  $r$  を増大してゆくと帯領域  $B_i(r)$ , ( $i=1,2,\dots,n$ ) もそれにつれて外延的に拡大してゆくが、その際に、もし平行曲線群に交叉する点が生ずるとその点は領域区分の境界点となる。帯領域の拡大を周辺領域との対応づけという観点からみると、これは次のような条件下での対応づけに相当している。すなわち、ある時刻  $t$  において周辺領域内の点で、母領域  $D_i$  への距離が  $r(t)$  以下のものは  $D_i$  に対応づけられるが、その際、対象となる母領域が複数ある場合にはより近いほうに対応づけるものとする。Voronoi 分割をこのように周辺領域と母領域との対応づけとみなすと、帯領域は上記の条件のもとで常に最大限対応づけ可能な周辺領域の範囲を示している。母領域の側からこの対応づけをみると、時間の経過に伴い帯領域が拡大してゆくことは、周辺領域の

近い点から順次対応づけを行うという意味である。この際、Voronoi 分割では各母領域に対し、無限の対応づけが可能とされている。この対応づけを避難の例でみると、母領域が避難場所、帯領域がある時間内に避難可能な地区に相当するが、この例からも明らかのように、現実的な適用に際しては、各母領域に固有の容量を設定する必要がある。モデルIIは母領域に容量を設定すると圏域構成がどのように変化するかを調べるもので、モデルIと同様に周辺領域の密度分布の設定の仕方にはふたとおりある。(図-3は均質な例で、図-5は図-4の重みをつけた例)周辺領域の密度が均質な場合には  $r$  は  $t$  に比例し、重みつけた場合には  $r$  は  $t$  の一般的な関数となる。具体的な作図法としては、周辺領域をグリッド化したものに対し、各母領域からの距離を計算し、それらを小さい順にソーティングし順序集合化する。この順序集合に対し、各母領域から近い順に対応づけを行うのであるが、母領域が容量に達するとその母領域に対する対応づけは中止し、容量に余裕のある母領域にのみさらなる対応づけを行う。

この分割法は、避難の例でいうと、局所的な近接性を重視した圏域策定の方法といえる。

2.3 モデル III

Voronoi 分割は周辺領域を最近隣の母領域に割り当てるが、2番目あるいは3番目に近い母領域に対する割り当ても同様に考えることができる。一般的に  $k$  番目に

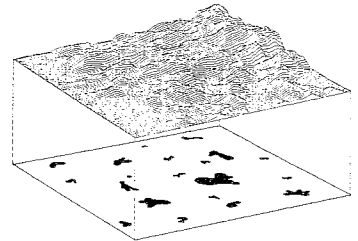


図-4 密度分布

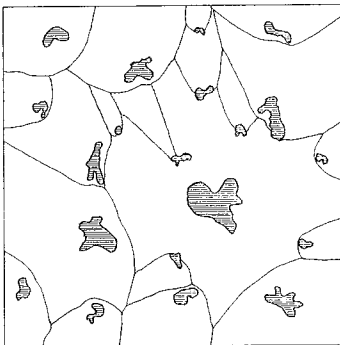


図-2 モデル I (均質)

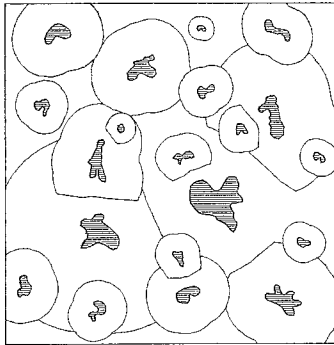


図-3 モデル II (均質)

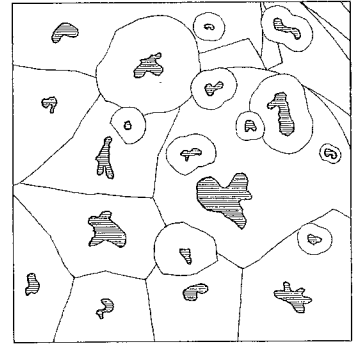


図-5 モデル II (重みづけ)

研究速報

近い母領域に対して割り当てられた領域区分をk次圏域と呼ぶ。モデルIIIはこの次数を優先させた領域分割で、次数ごとに母領域への距離の近い順に対応づけを行う。このモデルでも母領域の容量ならびに周辺領域の密度分布が考慮されている。具体的な作図法としては、先ず、1次圏域 (Voronoi 分割) を考え、その内部を母領域への距離に基づき順序集合化する。次に各母領域ごとに、容量の許す限り近い順から対応づけを行うが、容量が一杯になり対応づけの行われなかった部分に対しては2次圏域を考え、この内部をやはり順序集合化し、近い順に2次の母領域への対応づけを行う。そしてさらに必要があればより高次の圏域を考える。(図-6は均質な例)

この次数優先の領域区分は Voronoi 分割を理想的な状況と想定し、できるだけそれに近い形での領域区分を行う必要がある場合に有効である。避難の例でいうならば、避難場所の容量に制約がなければ理想的な避難区域は Voronoi 分割であるが、現実的には容量に限界がある。そこで、容量の許す限りは Voronoi 分割に基づいて区画割りを行うが、はみだした部分については次に近い場所に振り分けるという態度である。

図-7は図-2, 3, 6に示した3つのモデルについて、割り当てられた母領域との距離と次数の分布特性を比較したものである。モデルIIとIIIでは例示した母領域の配置に偏りが少ないため、距離分布に関しては大きな差異は見られないが、モデルIIIは Voronoi 分割に近い圏域を構成するという性質から、1次で帰属できない地域の次数が大きいのが特徴的である。モデルIの場合は距離の平均が最小となるため、分散も小さいが、近距離に帰属する地点の割合が他のモデルと比較して著しく小さく、モデルIIIと同様に次数が高次に渡って分布している。

3. 適用事例

本報告で提案した領域分割モデルを、東京都23区の震災時における広域避難場所と避難地区の割り当て問題に適用してみる。避難場所は現在137か所<sup>(1)</sup>あり、各場所に

対応した避難区域が指定されている(図-8)。避難区域の割り当てに際しては、避難計画人口<sup>(2)</sup>1人当りの有効面積を1m<sup>2</sup>以上、避難場所からの最遠点距離は3km以内に確保することを目標としている。以下の分析において避難場所の容量とは、その有効面積に1人/m<sup>2</sup>を乗じたものとして議論を進め、また、避難距離とは避難場所への最短直線距離を意味する。

23区内では避難場所の全容量に余裕があり、かつ、ほとんどの地域において避難場所への最近隣距離は3km以内になっている。ところが、配置の偏りと容量に制限があるため、区域の割り当てに際しては少なからず問題が生じている。現行の割り当て計画においても、避難距離が3kmを超えるいわゆる遠距離避難地域は、全避難区域面積の約6%に見いだされ、また次数が2次以上の避難場所を指定されている地域は約41%になっている。

図-9は Voronoi 分割の適用によって、避難区域の再構成を試みたものである。すべての避難場所においてそれぞれの Voronoi 圏域内の人口を収容できるという条件が満たされるならば最適な圏域構成となる。しかし、もしこの圏域構成に従って避難した場合、56か所の避難場所においてその許容量を超え、避難人口の約30%があふれるという状況が生じることになる。(図-9の網目部分)

この問題を解決するためには、すべてを最近隣の場所に割り当てるのではなく、2次あるいはさらに次数の大きい場所に割り当てなければならない。避難距離の大きさを問わないならば解は無限に存在するが、できるだけ距離は短かく、かつ次数も小さくする必要がある。この問題に対したとえばモデルIIIを適用すると、容量制限のために最近隣の場所に帰属できない区域に対し、次数と距離の順序関係を優先させた新たな再配分が行われる。これに対してモデルIIの場合は、許容量に達した場所の圏域境界線を保存したまま、余剰のある避難場所へ距離のみ優先させながら帰属させてゆくことになる。一方モデル

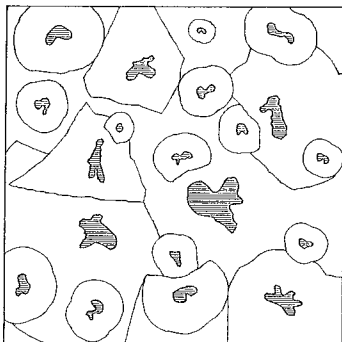


図-6 モデルIII (均質)

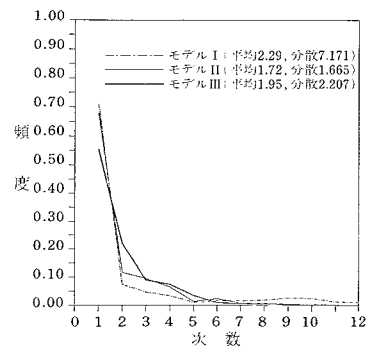
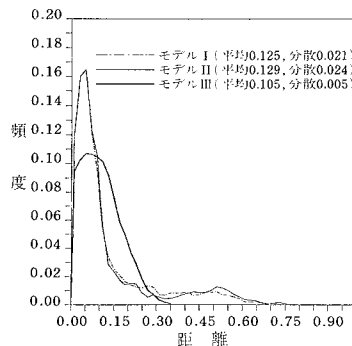


図-7 距離分布と次数分布の比較 距離は図2, 3, 6の一辺の長さを1.0としている



図-8 現行の避難場所と避難区域

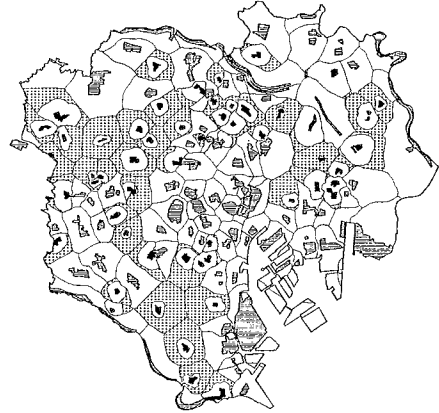


図-9 Voronoi 分割による圏域構成

ル I は、遠隔地に位置する人々の距離を全体で負担、軽減させるように再配分してゆくものである。したがって、きわめて近距離に位置していても他の場所に割り当てられることが多くなる。

図-10 にモデル II を適用して圏域を再構成した結果を示す。この図のように避難区域を設定すると、最近隣の避難場所に割り当てられる人口は約 70% に増加し、遠距離避難地域も、4% 程度に減少して現行の計画よりも改善されることがわかる。ただし、比較的大きな避難場所が密に配置されている都心部では Voronoi 分割との差異が小さく問題は少ないが、それを囲む環状地帯には最近隣の避難場所に帰属できない区域や遠距離避難地域が連担する。このような結果は配置そのものに起因するもので、避難場所の拡張・新設が必要な地域である。

#### 4. おわりに

以上、Voronoi 分割から派生した 3 つのタイプのモデ



図-10 モデル II による圏域構成

ルについての説明を行ったが、モデル I のように最適化問題としての意味が明快なものほかに、モデル II や III のようにむしろ“手続き”として規定するほうがその意義がより鮮明となるようなモデルも考えることができる。Voronoi 分割に基づくモデルとしてはほかに、たとえば、1 次圏域と 2 次圏域の差の大きい場所を優先させたものや、モデル II において母領域に至る距離の順序集合を逆にとり、遠い順にしたものなど様々なものが考えられ、適用する局面のもつ意味を十分に吟味した上で適切なモデルを選択する必要がある。

(1986 年 5 月 17 日受理)

#### 補 注

- (1) 1 か所が複数個の公園等で構成されている避難場所もあり、閉領域の個数としては 155 個で、また、その総有効面積は約 2,655 ha である。
- (2) 東京都の避難計画人口は約 1,171 万人である。これは昼夜間人口と将来の人口動態を考慮して算定されているため、実際の人口よりも多い。本論では昭和 55 年度国勢調査に基づく第 4 次メッシュデータ (約 500 m 角) を使用した。総計約 836 万人である。

#### 参 考 文 献

- 1) 伊理正夫ほか (1983) : 地理的情報の処理に関する基本アルゴリズム, pp.69~71, 日本 OR 学会
- 2) 藤井明 (1983) : 地域分析における幾何学的領域モデル, 都市計画No.126, pp.93~98
- 3) 及川清昭 (1985) : 面的施設配置の圏域構成に関する幾何学的研究, 日本都市計画学会学術研究論文集都市計画 No.20, pp.91~96
- 4) 東京都都市計画局 (1985) : 大震災時における避難場所及び地区割当計画