

## 論文の内容の要旨

論文題目 障害付ボロノイ図を用いた施設の圏域策定と最適配置に関する研究

氏名 今井 公太郎

本研究は障害付ボロノイ図 (*Voronoi diagram with Barriers*) という幾何学的モデルを、現実の都市や建築空間における施設の圏域策定や最適配置問題に応用する研究である。

都市には多種多様の施設が存在する。都市のユーザーである私たちは、この間の往来によって生活している。このことから施設をどのように配置させると良いかという問題は、私たちの生活に多大な影響を与えるばかりでなく、施設の繁栄にとっても死活問題であることは明らかである。このときの施設は、特定の施設に限定されることはなく、郵便局、病院、コンビニ、公園など都市空間や建築空間に配置される任意の機能を持った複数の要素ならば何でもあてはまる。

ユークリッド距離を前提に、理想的な無限平面上で施設の最適配置を考えた場合には、単純な六角形グリッドの幾何学的パターンが解として導き出される。ところが、これでは、さまざまな諸条件を取り扱うことは難しく、使い物にならない。なぜなら、都市や建築は均質ではなく、様々な障害や制約が存在するからである。例えば、都市には河川や、地形、崖地、森などの自然や、線路、高速道路といった長大な人工物、塀で閉ざされた街区など、人々の行く手を阻む多くの障害物が存在する。抜け道の存在や、開かずの踏み切りといった現象が、私たちの移動行動に与える実際の効果を考えれば、障害物の影響は歴然としている。したがって、障害や制約を無視して、仮に理想的な施設配置を求めることができても、現実への適用が難しいのは当然のことである。私たちは、すでに存在している空間の中で生活しており、施設の計画は今ここにある空間を前提になされなければならないのである。

本論では、このような問題意識に基づき、ユークリッド距離ではなく、障害付距離に基づいた圏域モデルである障害付ボロノイ図を取り扱う。それは、一般化されたボロノイ図の中でも、他のヴァリエーションを包含する汎用性の高い幾何学的モデルである。障害付ボロノイ図を用いて、さまざまな制約がある都市や建築空間に適用可能な、施設配置の解法を確立できれば、より現実的にかつ客観的な解析が技術的に可能になり、極めて有用な効果がもたらされる。

本論文は、序章と終章を除き、準備編(part 1)、基本編(part 2)、応用編(part 3)の3篇7章より成る。準備編(part 1)では、1章で、本論で用いる幾何学的概念を整理し、2章で既往研究の整理と本論の位置づけを行っている。基本編(part 2)では、3章で障害付ボロノイ図の独自の新

しい解法を提案し、4章でそのケーススタディとして公共空間における AED の配置を検討している。これにより、提案する方法が分析手法として有効であることを明らかにしている。応用編 (Part3) では、基本編 (part 2) で示した障害付ボロノイ図による分析手法が最適配置問題の解法へ発展、応用可能であることを明らかにする。5章で、障害付ボロノイ図を用いた一点配置問題として、距離が重み付けられた領域における一点ウェーバー問題の近似解法を提案し、面的要素のボロノイ図への応用を検討している。また 6章では、その多点配置問題として、障害付マルチウェーバー問題の近似解法を提案し、7章でそのケーススタディとして大学キャンパスにおける AED の最適配置を提案している。各章の概要を以下に述べる。

#### □準備編(part 1)

第1章では、2章以降で用いる主要な幾何学的概念・用語・定義を予め解説している。さらに、本論を進める上で用いた基本的な計算機のアルゴリズムについて整理している。

第2章では、本研究に関連する既往研究を俯瞰しつつ、本研究の位置づけを行っている。具体的にはネットワークの膨張 (*Dilation*) に関する研究、障害付距離に関する研究、障害付ボロノイ図に関する研究、そして、制約付ウェーバー問題 (ミニサム基準による最適配置問題) に関する既往研究について俯瞰し、本研究の主題である障害付ボロノイ図による圏域分割問題と最適配置問題の位置づけを行っている。

#### □基本編(part 2)

第3章では、自由形状の障害物の配置された平面におけるボロノイ図を、現実的で簡単な計算機アルゴリズムにより、近似解を求める独自の方法を提案している。アルゴリズムには、多数のランダムな母点を元に作図したドローネ網 ( $rDn$ ) を用いる。 $rDn$  により平面をセグメント化し、迂回距離を測定することにより障害付ボロノイ図の近似解を求めている。そのため、利用する  $rDn$  の等方性と  $rDn$  上の最短経路距離とユークリッド距離の比の安定性を計算機実験により検証している。また、厳密解が求められる単純な事例において、計算機実験により障害付ボロノイ図の近似解を求めている。これを厳密解と比較して得られた境界の信頼性を分析し、この方法の有効性を示している。さらにボロノイ領域における厳密な距離分布が、 $rDn$  上の最短経路距離の分布とほぼ一致することも明らかにしている。そして厳密解を求めるのが困難な例に対して障害付ボロノイ図を作図している。なお第3章の内容は、(査読付論文) 今井 公太郎・藤井 明：障害物の配置された平面におけるボロノイ図に関する研究— ドローネ網における最短距離を用いた作図法の提案, 2007年度 (第42回) 日本都市計画学会学術研究論文集, pp. 457~462 の内容に加筆・修正を加えまとめたものである。

第4章では、前章で提案した方法を、実際の都市・建築空間に適用している。3章の方法を適

用するケーススタディとして、上野公園における AED(自動体外式除細動: *Automated External Defibrillator*)の配置について分析と検討を行っている。AED の整備は個々の建物に任されてお  
り、統一的な配置計画の指針が存在しておらず、具体的な方法が必要である。AED は突然の心  
停止の発症者を発見してから、できるだけ早く使用する必要がある装置である。発作を起こした  
場所から装置へのアクセス距離を短くすることで、発症者の生存率を高めることができる。上野  
公園には、池や上野動物園などの大きな領域があり、植栽や塀などが多く、直線距離と現実的な  
アプローチのための最短経路距離が大きく異なる。こうした状況を考慮し、障害付ボロノイ図を  
用いて、現状の AED 配置の圏域を策定、分析している。その際に、アクセス距離をアクセス時  
間に換算すると、心停止の発症者に対して AED を使用した場合の生存率が求められるので、  
AED による救助プロセスを分析し、障害付距離と生存率の関係を定式化している。そして、AED  
による生存率を地図上にプロットし、その偏りや平均生存率を算出している。具体的には、AED  
を母点とする障害付の各ボロノイ圏域において、AED へのアクセス距離の分布を調べて、AED  
配置の手薄なところをあぶりだしている。この結果に基づき、手薄なところへ AED を追加配置  
すると仮定した場合の、圏域の変化やアクセス距離の変化を計量している。その結果、現在、平  
均アクセス距離 343mの配置状況を AED 追加により、平均アクセス距離 119mまで改善する(平  
均生存率 18 パーセントの改善) 配置の提案を行っている。なお、第 4 章の内容は、(査読付論  
文) Kotaro Imai, Akira Fujii and Kenji Nabeshima, AED Location in Public Spaces: A Case  
Study in Ueno Park Using Voronoi Diagrams with Obstacles, *Journal of Asian Architecture  
and Building Engineering*, vol.7, no.2, November 2008, pp. 271~278 の内容に加筆・修正を加  
えまとめたものである。

#### □応用編(part 3)

応用編では、基本編で提案する分析手法の最適配置問題への応用を提案している。第 5 章で  
は、重み付けられた領域における制限付き(一点)ウェーバー問題の近似解法へ発展させている。  
まず、ランダムなドロネー網 ( $rDn$ ) の、重みづけられた各領域の辺長に重み付けをしたネット  
ワーク上における最短経路が、厳密解と同じように、スネルの法則やレンズメーカーの式に従っ  
て屈折することを明らかにし、近似解として有効であることを検証している。この方法によって、  
得られた最短経路をメッシュの全ての点に対して求めることによって、一点ウェーバー問題の近  
似解を導く手法を明らかにしている。さらに、この手法を応用して、重み付けられた領域の重み  
を無限大にした領域を障害物、重みを 0 とした領域を母領域と見なすことによって、一般的なボ  
ロノイ図の実用的な構築方法を提案している。また、最適性基準とその幾何学的解釈について述  
べている。なお、第 5 章の内容は、(査読付論文) 今井 公太郎・藤井 明：重み付けられた領  
域における制限付きウェーバー問題の近似解法, 2008 年度(第 43 回) 日本都市計画学会学術研  
究論文集, pp. 85~90 の内容に加筆・修正を加えまとめたものである。

第 6 章では、3 章の解法のさらなる発展として、障害付多点ウェーバー問題への近似解法を提

案している。連続平面状におけるウェーバー問題を  $rDn$  上における  $p$  メディアン問題に変換した上で、模擬焼きなまし法を独自に応用した方法で近似解法を提案している。その方法を用いて、単純な形状の障害物が配置されたモデルに対して実験を行い、厳密解と比較する事で方法の有効性を検証している。

第7章では、前章の方法を用いて、大学キャンパスにおける AED の最適配置問題への適用事例を示している。まず、現状の AED 配置の評価、および、障害物が配置されていない場合と比較している。そして、焼きなまし法の安定性を確認するために、初期値を変化させても、ある程度安定した結果が導き出されていることを確認している。さらに、供給点の数を変化させた場合の平均距離の変化を調べて、現状の配置の最適性を評価し、より少ない供給点で同じ平均距離を満たす最適配置の提案をしている。そして、供給点の数と平均距離の関係を回帰分析し、障害物が配置された状況においても最適配置において、供給点密度と平均距離に一定の関係があることを明らかにしている。なお、第6章および第7章の内容は、(査読付論文) 今井 公太郎・藤井 明：障害付多点ウェーバー問題の近似解法・大学キャンパスにおける AED 配置のスタディ -, 2009 年度 (第 44 回) 日本都市計画学会学術研究論文集, pp.805~810 の内容に加筆・修正を加えまとめたものである。

終章では、本論の結論を述べ、成果を整理している。そして、今後のこの研究の発展の可能性について論じている。また、本論の脚注ならびに、本論で参照した文献についても巻末に掲載している。