

浜松市南部における津波避難ビル配置の ボロノイ図を用いた分析

安藤 和敏

静岡県浜松市に位置する浜松学芸高校は、平成 24 年度にサイエンス・パートナーシップ・プログラム (SPP) による企画「最適化入門：浜松の最適区割りと音楽に関する最適化」を実施した。この企画は、浜松学芸高校、文教大学情報学部および筆者の所属する静岡大学工学部との連携によって実施された。この企画の一環として、筆者の指導のもとで浜松学芸高校普通科 2 年の生徒数名によるグループ研究「浜松市南部における津波避難ビル配置のボロノイ図を用いた分析」が行われた。この研究の内容について報告する。

キーワード：ボロノイ図, 津波, 避難, 施設配置問題, 高大連携

1. はじめに

平成 24 年度に科学技術振興機構の主催する事業、サイエンス・パートナーシップ・プログラム (SPP) によって採択された企画「最適化入門：浜松の最適区割りと音楽に関する最適化」(実施機関：浜松学芸高校, 連携機関：静岡大学工学部, 文教大学情報学部) の一環として実施されたグループ研究について紹介する。本企画は二つのテーマから構成されている。一つは、施設配置問題に対する数理的アプローチであり、もう一つは楽器の演奏法に関する数理的アプローチである。浜松は、東海地震の想定震源域のほぼ中心に位置しているため、自治体による地震対策が長年施されてきた。浜松市における避難施設の配置、避難区域の設定をテーマにした学習成果は今後の浜松市の防災対策・教育の一助になる。また浜松市は、ヤマハ、河合楽器、ローランドなど楽器産業が集積する「楽器のまち」であるとともに、近年では「音楽のまちづくり」を掲げさまざまな音楽文化事業を展開している。さらに、実施機関である浜松学芸高校には芸術科音楽課程および電子音楽課程が設置されており、学芸高校の生徒にとって楽器の演奏法に関する数理的アプローチは身近なテーマである。

前者のテーマについては、静岡大学工学部の関谷和之教授が「宅配ピザの店舗と配達区域」という例を用いて、施設配置問題に対するボロノイ図を用いたアプローチに関する講義と計算機を用いた実習を行った。後

者のテーマに関しては、筆者が最短路問題に関する講義および計算機を用いた実習を行った後、文教大学情報学部の堀田敬介准教授が、ピアノの運指最適化を最短路問題として定式化する方法についての講義とそれに関連する計算機実習を行った。これらの一連の講義と実習には浜松学芸高校の普通科 2 年の生徒約 40 名が参加した。

この 2 テーマについての講義と実習を受講した生徒の中から、2 グループ計 11 名の生徒がその後のグループ研究を行うことを希望した。6 名のグループを関谷教授が指導し、5 名のグループを筆者が指導した。本稿では、筆者が指導を行った 5 名の生徒 (井嶋優衣さん、加藤千聡さん、鈴木聖乃さん、高見悠暉さん、村山詩織さん) による研究「浜松市南部における津波避難ビル配置のボロノイ図を用いた分析」について紹介する。

2. 浜松市における津波避難対策

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災とそれによって引き起こされた津波は東北地方から関東地方の太平洋岸に大きな被害をもたらした。この地震では、従来の防災計画では想定できていなかった事態や、想定をはるかに上回る規模の災害が発生した。こうした状況を踏まえ、近い将来に大規模地震が発生することが予想されている地域の自治体では、震災に対する対策の抜本的な見直しが進められている。

静岡県西部地方が面している遠州灘沖の海底は、大規模地震の発生帯である南海トラフの一部である (図 1 を参照のこと)。今後 30 年以内に南海トラフ沿いで M8 以上の地震が発生する確率は、東海地震が 88%、東南

あんどう かずとし
静岡大学大学院工学研究科
〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1

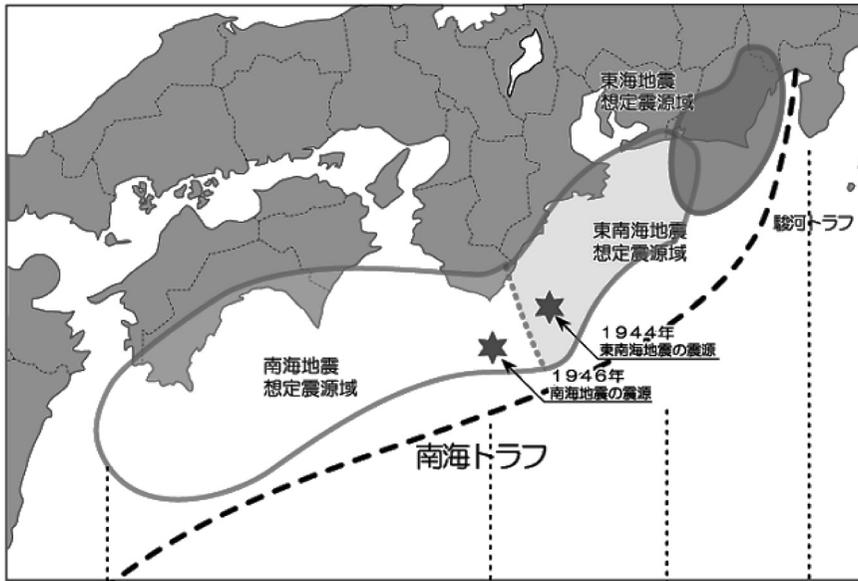


図1 南海地震、東南海地震、東海地震の想定震源域 [1]

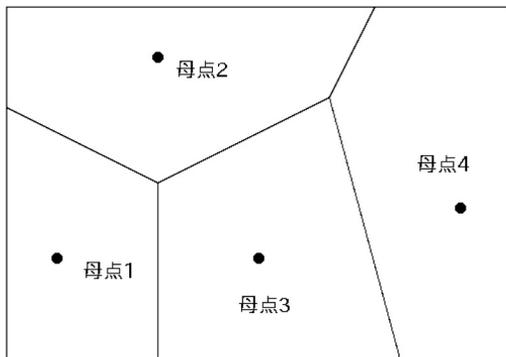


図2 ボロノイ図の例。2次元平面は、これらの四つの点のどの点に最も近いかに応じて四つのボロノイ領域に分割される。

海地震が70%程度、南海地震が60%程度と予想されている [2]。これらの大規模地震が連動して起こる可能性も指摘されており、そうした場合には地震が個別に発生したときよりさらに大きな被害が及ぶと考えられている。したがって、地震による津波災害の対策は静岡県沿岸地域に位置する自治体にとって喫緊の課題である。

浜松市では、平成23年度に浜松市津波対策委員会を設立し、3回にわたって浜松市の南部における津波対策を検討してきた。津波対策委員会によって策定された津波対策の一つが津波避難ビルである。津波避難ビルとは、民間ビルなどの一部を一時的に避難場所として使用することができるように市と所有者、管理者と

が協定を結んだ建物のことである [3]。浜松市南部の沿岸部には高台が少ないため、津波が発生したとき、または発生のおそれがあるときには、市民が津波から避難するためにそのような人工建造物が必要である。

本研究ではこの指定された津波避難ビルを母点としてボロノイ図を作成し、二つの観点から調査した。一つは津波避難ビルの収容能力の観点からの分析、もう一つはボロノイ領域の最遠点からの移動時間の分析である。

3. ボロノイ図の作成

ボロノイ図とは、ある平面上に配置された母点と呼ばれる複数個の点に対して、その平面内の各点を、どの母点に最も近いかによって分割した図のことである。分割によって生じる各領域は多角形を成しており、これらの多角形はボロノイ領域と呼ばれる。図2に四つの母点を持つボロノイ図を示した。ボロノイ図は公共施設や商業施設の立地を分析するための重要なツールとして多くの応用がある [4]。ボロノイ図についての詳しい解説については [5] を参照されたい。本研究では、母点を浜松市が指定する複数の津波避難ビルとしてボロノイ図を作成する。このとき、各ボロノイ領域はその領域に含まれる避難ビルに最も近い地点から成る。

浜松市津波対策委員会は暫定的な津波対策範囲として、1854年に発生した安政東海地震における津波の推定浸水域に海岸線から2km以内の地域を加えたものに設定した [6]。浜松市がこの範囲を津波対策範囲とし

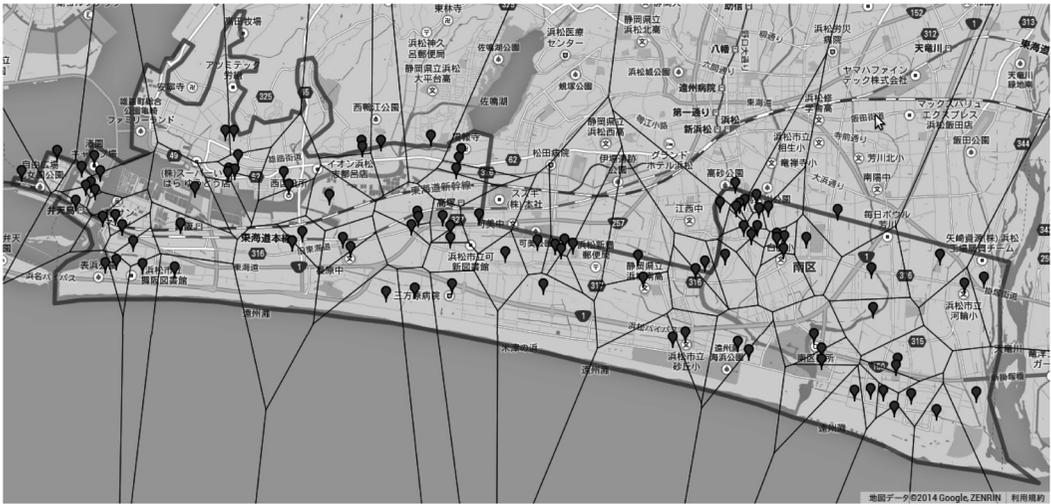


図3 Google Maps API を用いて作成されたボロノイ図。太線で囲まれた領域が分析対象領域である。

て指定した理由は、仙台湾が遠州灘と地形が似ているということ、および、東日本大震災の際、仙台湾から2kmの範囲までは家屋の流失が確認されたという浜松市による調査結果からである。本研究が分析対象とした領域もこの範囲とほぼ同じにした。さらに、「休日の昼間に地震が発生した」という設定で分析を行う。

浜松市が指定した津波避難ビルは207棟あり、この207棟はWebページなどを通じてすべての市民に公表されている。このほかにも非公開の津波避難ビルは約40棟あり、その情報は関連する地域の自治会にのみ報告されている。今回の分析は公開されている津波避難ビルのみを用いて行った。市の指定した207棟の津波避難ビルの中で、分析対象領域外からは除き、さらに近くにある複数の避難ビルを一つにまとめ、最終的に99棟に集約した。

これらの集約した津波避難ビルを母点として図3に示すようなボロノイ図を作成した。ボロノイ図の作成は、筆者が作成したGoogle Maps APIを用いたプログラム[7]を利用した。プログラムに対する入力には避難ビル99棟の座標情報であり、これらは彼女たちが避難ビルの住所リストを頼りにGoogle Mapsによって得たものである。

4. 収容能力の観点からの分析

各ボロノイ領域内の人口とその領域に対応する避難ビルの収容可能人数を比較して、避難ビルの収容能力の観点から分析を行った。

まず各ボロノイ領域の人口の推定をした。分析の対象となる地域には、47個の町丁が存在する。各町丁の



図4 領域内人口密度の推定

人口と面積は浜松市が公表している統計情報から入手できるが、一つのボロノイ領域は一般に複数の町丁にまたがって存在している。例えば、図4に示すボロノイ領域には、大柳町(おおやなぎちょう)、四本松町(しほんまつちょう)、下江町(しもえちょう)、巣野町(ねずみのちょう)、御給町(ごきゅうちょう)の五つの町丁を含む。したがって、ボロノイ領域内の人口を何らかの形で推定する必要がある。正確な推定は困難であったためボロノイ領域にあるすべての町丁について人口密度の平均をとり、そのボロノイ領域の人口密度とした。これに、そのボロノイ領域の面積を掛けてそのボロノイ領域の人口を得た。この人口がそのボロノイ領域の母点となる避難ビルを利用する人数となる。

各避難ビルの収容能力を見積るために、1平米あたりに避難可能な人数を1人と仮定した。したがって、各

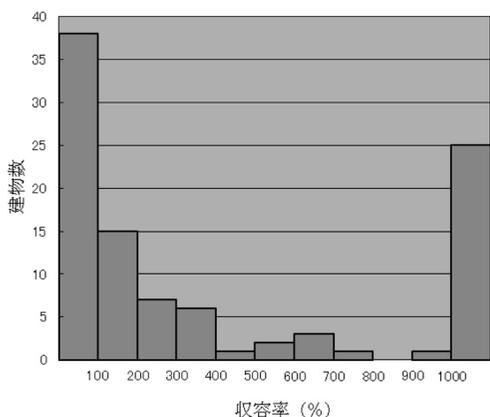


図5 収容率の分布

避難ビル内の避難目的で利用可能な部分の面積が、その避難ビルの収容可能人数となる。避難ビルの収容可能人数に対するポロノイ領域内人口の割合をパーセントで表したものを、その避難ビルの収容率とし、収容率を横軸に建物数を縦軸で示したグラフが図5である。この図から、収容率が1000%を超える避難ビルが全体の4分の1近くも見ることが見てとれる。

5. 最遠点からの移動時間の分析

一つのポロノイ領域の中で避難ビルまでの距離が最大となる地点を考える。この地点をその領域内の最遠点と呼ぶ。最遠点から避難ビルまで避難するために要する時間を評価し、地震発生から津波が到達するまでの時間と比較することによって、避難ビルの配置の妥当性を検証した。

浜松市が行ったシミュレーション [8] によると、東海地震発生後5~10分で津波の影響による遠州灘の海面上昇が20 cm以上になり、15分には天竜川の河口付近が浸水する。また、地震の規模がM9.0クラスときには、15分から30分間に浜松市の南部のほぼ全域に津波が侵入すると予想されている。彼女たちは最悪のシナリオを想定して、地震発生から津波の到達までの時間を10分と15分の二つに分けて分析を行った。

一つのポロノイ領域の最遠点から避難ビルまでの距離を d [m] とし、避難のために移動する速さを v [m/分] とすると、移動に要する時間は d/v [分] である。実際には、地震発生から避難を開始するために要する時間がかかるため、この時間を避難準備時間と呼び p [分] で表すと、地震発生から避難ビルまで避難するために要する時間は

$$d/v + p$$

[分] である。北海道南西沖地震アンケート調査結果 [9] によると避難するまでにかかった時間で最も多かったのが5分であったため、避難準備時間 p は5分と設定した。避難のために移動する速さ v は、

- (1) 50~70歳代の人の速足での速度で約100m/分、
- (2) 障害者の歩行速度（車いす利用者の場合）だと約55m/分

である。避難ビルから対応するポロノイ領域内の最遠点までの距離 d は Google Maps API の機能を用いて計測した。

移動速度を(1)に設定した場合の分析結果は図6のようになった。この地図の白で塗られている領域はその領域内の最遠点から5分以内で移動できる領域、薄いグレーの領域は6~10分で移動できる領域、濃いグレーの領域は11~15分で移動できる領域、黒の領域は16分以上かかる領域である。津波が地震発生後15分で到達すると考えると、10分以内で移動する必要がある。したがって、白と薄いグレーで塗られた範囲の領域では、その領域内のどの地点からでも避難できる。津波到達時刻が地震発生後10分とすると、津波避難ビルまで5分で移動する必要がある。したがって、白で塗られた領域以外の領域には津波が到達するまでに避難が完了しない地点が存在するが、白で塗られた地域は少ない。

移動速度を(2)に設定した場合の分析結果は図7のようになった。地震発生後10分で津波が到達した場合、最遠点から津波到達までに避難可能な領域が1カ所しかない。また、15分で津波が到達すると考えた場合にも、ほとんどの領域において津波が到達するまでに避難ビルまで避難ができない地点が存在する。

6. まとめ

浜松市が指定する各津波避難ビルを母点に対してポロノイ図を作成し、各ポロノイ領域内の人口と対応する避難ビルの収容能力との比較、および、避難ビルからポロノイ領域内の最遠点までの移動時間を測定することにより、現在の津波避難ビルの配置の妥当性を検証した。収容能力についての分析の結果、対応するポロノイ領域内人口の5分の1以下の収容能力しか持たない津波避難ビルは全体の約3分の1にのぼり、さらに全体の約4分の1の避難ビルの収容能力は、ポロノイ領域内人口の10分の1以下であることがわかった。また、移動時間に関する分析の結果、50~70歳代の人で早足で移動ができる人ならば避難できる可能性が高いが、車いす利用者等は避難しきれない可能性が非常

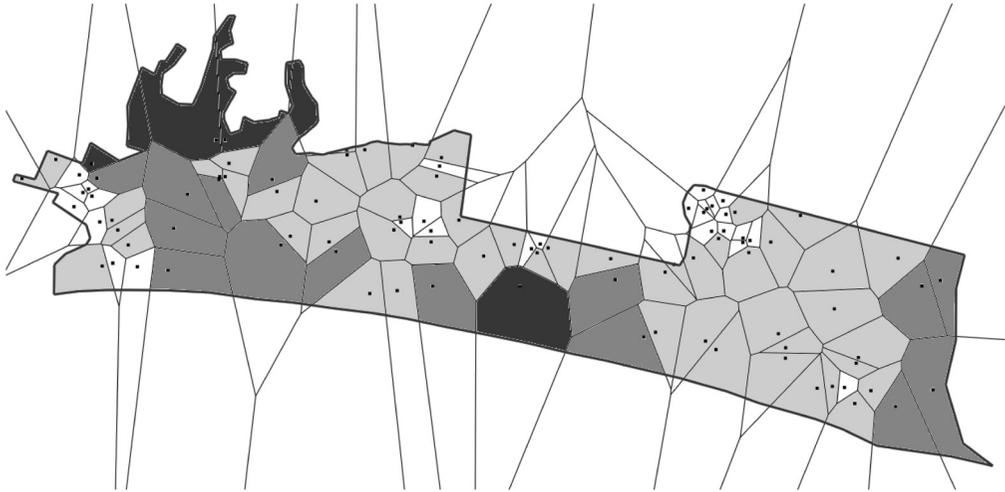


図6 最遠点からの移動時間 (1)



図7 最遠点からの移動時間 (2)

に高いことがわかった。浜松市全地域の中で、車いす利用者、災害時要援護者の対象者の数は、平成23年3月16日時点で、17,540人いる。こういった人たちがどうやって津波避難ビルまで避難するかを事前に考えておくべきである。

7. おわりに

平成23年の7月から始まったグループ研究は、9月頃最初の壁にぶつかった。というのは、避難ビルの位置は特定できたもののそこからボロノイ図を描くという段階で試行錯誤していたからである。最初は白地図に手書きでボロノイ図を描こうとしていたのだが、その後の分析のためにはやはり計算機を使ったほうがいい

だろうと判断し、Mathematicaを使うことになった。しかし、これもうまくいかないことがわかった。なぜならば、Mathematicaの出力を地図に重ね合わせるうまい方法が見つからず、出力結果を見ても正しい結果なのかどうか判断がつかなかったのである。地図の上にボロノイ図を重ね合わせるようなプログラムを探したが適当なものが見つからなかったので、Google Maps APIとボロノイ図を描画するJavaScriptのプログラム[10]を組み合わせたプログラムを筆者が作成して、どうにかその後の分析につなげることができた。ただし、このプログラムですべての計算が計算機上で行うことはできず、第4節で述べたボロノイ領域内の人口密度とボロノイ領域の面積の測定では地道な手作業が

必要であった。第5節で述べた最遠点から避難ビルまでの距離の測定も同様であった。

今回のSPPでのグループ研究では、最初から研究成果を外部に発表するということを目標にして研究を続けてきた。その理由は、そうした目標を持つことで質の高い研究を行うためのモチベーションを維持することができるということ、および、研究を行ってその成果を発表するという理科系の大学4年生が行っているプロセスを高校生の時点で体験することは、高校在学中および大学進学後の勉学と研究において非常に有益であると考えたからである。研究の成果をまとめられる見通しが立った平成24年の12月、翌年の2月2日にオペレーションズ・リサーチ学会の研究部会「評価のOR」の学生発表会において発表する機会を与えられた。年が明けてからは、ほとんど毎週発表のためにミーティングを行って本番への準備を進めた。その甲斐あって、発表会では彼女たちの研究成果とプレゼンテーションは主催者の先生方から高く評価され、研究部会より学生奨励賞を受賞する榮譽を得た。学業と部活の合間を縫って堅実な努力を続けた成果の賜物であると思う。何度か壁にぶつかりながらもあきらめずに、また、当時まだ高校2年生だった彼女たちに対してつい厳しいことを言ってしまった筆者から逃げることなく、長い間最後まで仕事をやり遂げた彼女たちは賞賛に値する。

本研究ではボロノイ図を定義する際に、距離としてユークリッド距離を用いたが、実際に津波から避難する際には道路に沿って避難するため、ユークリッド距離に基づいたボロノイ図は現実的ではないのかも知れない。また、実際にボロノイ領域に住所がある人たちが地震発生時に自宅にいるとは限らないし、自宅にいたとしても避難ビルに避難するとは限らない。このように本研究はモデルの妥当性やデータの正当性にはやや信頼性に欠ける部分もあるかもしれない。それにもかかわらず、本研究は研究を行った当時の避難ビルの配置の問題点を指摘するための説得力を持っていると

思われる。

本研究が終了してから1年以上経過した。浜松市の指定する津波避難ビルの数は平成25年5月1日現在で212棟に増えた。津波避難ビルのほかにも「津波避難マウンド(盛土)」2カ所と「津波避難タワー」7基の工事が進行中である。また、浜松市の沿岸部に総長17.5kmにわたる防潮堤の整備も開始されている。結びの言葉として彼女たちの言葉を借りる。「一刻も早くこれらの施設を完成させ、また、津波避難ビルの指定をさらに増やすことによって、市民が安心・安全に暮していける街を目指していく必要がある。」

謝辞 原稿を読んで有益なコメントをくださった静岡大学大学院工学研究科の関谷和之氏および筑波大学システム情報系の鶴飼孝盛氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 気象庁, 「東海地震について」, <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tokai/index.html>
- [2] 内閣府, 「南海トラフの巨大地震モデル検討会第1回会合(平成23年8月28日開催)資料2」, <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/1/pdf/2.pdf>
- [3] 浜松市, 「津波避難ビルの指定について」, <http://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/kiki/disaster/bousai/building/index.html>
- [4] 鈴木敦夫, 最適配置問題をボロノイ図で考える, 都市のOR第53回シンポジウム(2005年3月), pp. 37-44, 2005.
- [5] 杉原厚吉, 『なわばりの数理モデル—ボロノイ図からの数理工学入門—』, 共立出版, 2009.
- [6] 浜松市津波対策委員会, 第1回委員会資料(平成23年10月25日開催).
- [7] 安藤和敏, 「浜松市における津波避難ビルのボロノイ図」, <http://coconut.sys.eng.shizuoka.ac.jp/evacbuil/>
- [8] 浜松市津波対策委員会, 第3回委員会資料(平成24年3月18日開催).
- [9] 浜松市津波対策委員会, 第2回委員会資料(平成23年12月15日開催).
- [10] R. Hill, A Javascript implementation of Fortune's algorithm to compute Voronoi cells, <https://github.com/gorhill/Javascript-Voronoi>