

ネットワーク上のオーダー n のボロノイ図の実装と応用に関する研究

山本裕貴*・奥貫圭一**

Implementation of n th-order network Voronoi diagram and its application

Hiroki Yamamoto*, Kei-ichi Okunuki**

Abstract: In this paper, we show an implementation of the n th-order network Voronoi diagram and apply it into disaster analysis. The n th-order Voronoi diagram allows us to visually recognize the nearest, second nearest, third nearest, ..., and n th nearest facilities from any point. We extend the n th-order Voronoi diagram into on a network, since we usually move along the roads of a road network. The extended diagram is called the n th-order network Voronoi diagram. We implement a tool to obtain the n th-order network Voronoi diagram. The tool is developed using the R language with both igraph and sf packages. The sf package can handle GIS data. The implemented tool is applied river flood evacuation analysis in Hamamatsu city and through the application, we discuss the usefulness of the n th-order network Voronoi diagram.

Keywords: ボロノイ図 (Voronoi diagram), 利用圏分析 (service area analysis), オーダ n (n th-order), sf パッケージ (sf package)

1. はじめに

この論文では、オーダー n のボロノイ図をネットワーク空間上に拡張・描画するためのツールの実装について考える。さらに静岡県浜松市を事例に、道路ネットワーク上に描かれたオーダー n のボロノイ図の防災計画への応用可能性について論じる。

近年、大規模な水害が頻繁に起こり、避難を巡る問題が浮き彫りになっている。例えば令和2年7月豪雨では、開設された避難施設が浸水のために閉鎖されたり、そもそも避難施設として開設できなかったりと、事前の避難計画が実際と合わない事態が生じた。避難に関する既存研究(市川ほか, 2004; 中山ほか, 2008)を見ても、住民が最近隣の1つの避難施設へ避難する行動を想定しており、その施設を活用できない事態を考慮した研究はほとんどない。しかし実際には、最近隣の避難施設を含めて、特定の1つの避難施設だけを住民の避難先候補として計画してしまうと、いざ水害がおこった時に対応できない事態が生じ得る。避難行動を通して災害のリス

クを軽減するためには、住民にとっての複数の避難施設をあらかじめ考えておくことが必要であろう。

そこでここでは、住民にとって最近隣の避難施設だけではなく、2番目(さらに、3番目, ..., n 番目)に近い避難施設を考えるため、オーダー n のボロノイ図を道路ネットワーク空間上に描き、その有効性を検証する。オーダー n のボロノイ図は、その母点のうち、ある地点にとって最近隣の母点から n 番目に近い母点までの組み合わせについて、その組み合わせが同一となるような地点の集合領域を示すものである。このボロノイ図は、その母点となる施設が「開設できない」「アクセスできない」などの理由で機能していない場合があり得る災害時等に有用とされている(Ickjai et al. 2009)。Okabe et al. (2008)は、一般ボロノイ図をネットワーク空間上に拡張することを示し、その中で、オーダー n のボロノイ図をネットワーク空間上に描く算法を紹介している。しかしながら、その実装については言及がなく、そのためか、この応用について検討した研究はほとんど見られない。

* 学生会員 名古屋大学大学院環境学研究科 (Nagoya University)

〒464-8601 名古屋市千種区不老町 D2-1 (510) Tel : 052-789-2236 (代表)

** 正会員 名古屋大学大学院環境学研究科 (Nagoya University)

以下では、オーダ n のボロノイ図を道路ネットワーク上に描くために、その実装を試み、さらに、これを洪水防災計画へ活用する有効性を検討する。

2. オーダ n のネットワークボロノイ図

ここではまず、オーダ n のボロノイ図および、オーダ n のネットワークボロノイ図について述べる。

2.1. オーダ n のボロノイ図

いま、ある点 p があり、そこから最も近い施設（母点と呼ぶ）と2番目に近い施設（母点）の組み合わせが点 p_i と点 p_j であるとする。このような条件を満たすすべての点の集合を、母点 p_i と p_j のオーダ2のボロノイ領域 $V(p_i, p_j)$ と呼ぶ。すなわち、

$$V(p_i, p_j) = \{p \mid d(p, p_i) \leq d(p, p_k), d(p, p_j) \leq d(p, p_k), i \neq k, j \neq k, k = 1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

である。ここで、 $d(p, p_i)$ は、点 p から点 p_i までの直線距離、 m は母点の数をそれぞれ表す。このボロノイ領域 $V(p_i, p_j)$ を母点の組み合わせのすべてについて求め、これを描いた図がオーダ2のボロノイ図である。同様に、オーダ n のボロノイ図では、 n 番目に近い施設までを考えれば良い。詳しくは、岡部・鈴木（1992）を参照されたい。

2.2. オーダ n のネットワークボロノイ図

オーダ n のボロノイ図をネットワーク空間上に拡張して描いたものを、ここでは、オーダ n のネットワークボロノイ図と呼ぶこととする。ネットワーク空間における母点 p_i と p_j のオーダ2のボロノイ領域を $NV(p_i, p_j)$ と書けば、

$$NV(p_i, p_j) = \{p \mid d_s(p, p_i) \leq d_s(p, p_k), d_s(p, p_j) \leq d_s(p, p_k), i \neq k, j \neq k, k = 1, 2, \dots, m\} \quad (2)$$

である。ただし、ここで $d_s(p, p_i)$ は点 p から点 p_i までの最短経路の経路長を表す。このボロノイ領域 $NV(p_i, p_j)$ を母点の組み合わせのすべてについて求め、これを描いた図がオーダ2のボロノイ図である。図-1は、道路ネットワークに8つの母点が存在する場合のオーダ2のネットワークボロノイ図である。この図で、それぞれの色で示された道路ネットワークの部分が、ひとつひとつのボロノイ領域 $NV(p_i, p_j)$ に該当する。オーダ2の場合と同様に、オーダ n のネ

ットワークボロノイ図とは、道路ネットワーク上の最短経路長で n 番目に近い施設までを考えれば良い。

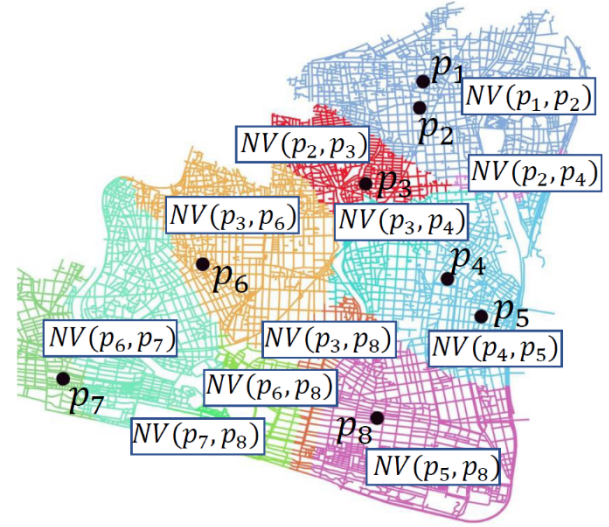


図-1 オーダ2のネットワークボロノイ図の例

3. オーダ n のネットワークボロノイ図出力の実装

3.1. R を利用した実装

オーダ n のネットワークボロノイ図を得るための実装にあたって、ここでは開発実行環境Rを用いる。Rはマルチプラットフォームであり、プラットフォームの違いに左右されず同じ動作が保証されている。Rで動作するパッケージ（計算機能の集合体）には、さまざまなものがあり、地理情報を処理するものも開発されている。そのうち近年開発されたものにsfパッケージと呼ばれるものがあり、これを利用するとシェープファイルを含めたGISデータを扱うことができる（Pebesma, E. J. 2018）。一方、igraphと呼ばれるパッケージ（Csárdi, G., and T. Nepusz., 2006）を利用することで、最短経路を算出することができる。ただし、igraphにはシェープファイルの入出力する機能がないので、igraphへのインタフェースとしてshp2graphと呼ばれるパッケージを利用する。このパッケージはBinbin et al. (2018)によって開発されたものである。これらのパッケージは、いずれもRのバージョン3.0以降での動作が保証されている。

図-2に、ここでの実装に用いたRのパッケージとGISデータの入出力の流れを示した。この図で、ネットワークボロノイ図を得るための部分は、最短経路探索を担うigraphである。その他の部分は、igraph

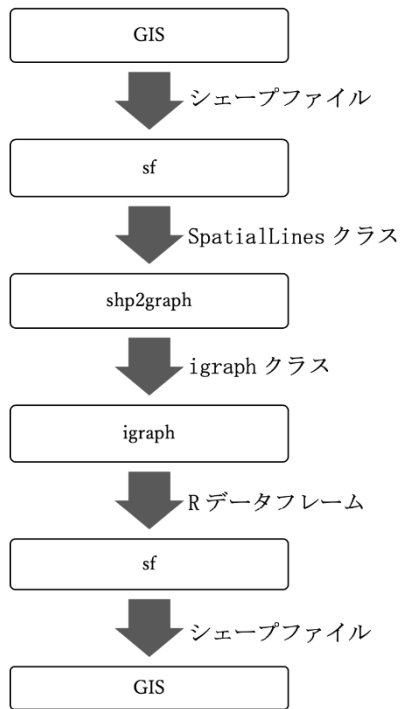


図-2 R のパッケージを利用した
GIS データ入出力の流れ

へ GIS データを渡すため、あるいは、igraph によって得られたネットワークボロノイ図のデータを GIS データとして渡すためのものである。GIS データとしてシェープファイルを入力すると、まず、sf パッケージによって、R で空間データを処理するためのクラスとして用意されている SpatialLines クラスへ変換される。SpatialLines クラスへ変換された空間データは、shp2graph パッケージへ入力され、igraph パッケージのための igraph クラスと呼ばれるクラスへさらに変換される。igraph クラスへ変換された空間データは、igraph パッケージの持つ計算機能によって最短経路探索がなされ、その結果として、オーダー n のネットワークボロノイ図を描くために必要なデータが得られる。ただしここで得られる計算結果のデータは R のデータフレームと呼ばれるデータ形式で出力される。これを GIS で図化するためには、シェープファイルへ変換する必要がある、それを担うのが再び sf パッケージである。以上の手順を経て、オーダー n のネットワークボロノイ図を求めて、GIS 上でこれを描くことができる。

3.2. オーダ k のネットワークボロノイ図を得る手順

実装にあたって、オーダー n のネットワークボロノイ図を算出する手順を述べておく。ここでは、オーダー $k-1$ のネットワークボロノイ図が所与であることを前提とし、このとき、オーダー k のネットワークボロノイ図を得る素朴な手順を考えて実装することにする。

例として、オーダー 1 すなわち通常のネットワークボロノイ図が所与であり、オーダー 2 のネットワークボロノイ図を求めるための手順を考える。このとき、オーダー 1 のボロノイ領域 $NV(p_i)$, $i = 1, 2, \dots, m$ が所与とする。ボロノイ領域 $NV(p_i)$ について、母点 p_i を除く $m-1$ 箇所の母点を生成元とするネットワークボロノイ図を求める。すると、 $NV(p_i)$ は領域分割され、ひとつひとつの領域がオーダー 2 のネットワークボロノイ領域にあたる。この操作をすべてのボロノイ領域 $NV(p_i)$ について繰り返せば、最後にオーダー 2 のネットワークボロノイ図が得られる。同様の手順で、オーダー $k-1$ のネットワークボロノイ図が所与であるとき、そのすべてのボロノイ領域についてネットワークボロノイ図を求めていけば、オーダー k のネットワークボロノイ図を得ることができる。

この手順の計算量について考えておく。ネットワークの辺集合 E 、頂点集合 V とすると、ネットワークボロノイ図を得る手続きの計算量は $O(|V| + |E|\log|E|)$ であることが知られている (Okabe et al., 2008)。これを踏まえると、上記のオーダー k のネットワークボロノイ図を得る手順では、オーダー $k-1$ のネットワークボロノイ領域のすべて（その数を r とする）についてネットワークボロノイ図を算出するので、全体の計算量は、 $O(r|V| + r|E|\log|E|)$ である。ここで、ボロノイ領域の数 r は、ネットワークの辺の数 $|E|$ や頂点数 $|V|$ と比べてずっと小さいことが多いであろうから、一般的には、全体の計算量が $O(|V| + |E|\log|E|)$ におさまると期待できる。

図-3、図-4 は、 $|V| = 29366$, $|E| = 34576$ の道路ネットワークで、母点数 $m = 17$ について、それぞれオーダー 2、オーダー 3 のネットワークボロノイ図を実際に求めて描いたものである。一方、図-5、図-6 は、道路ネットワークと母点数の規模をさらに大きくし

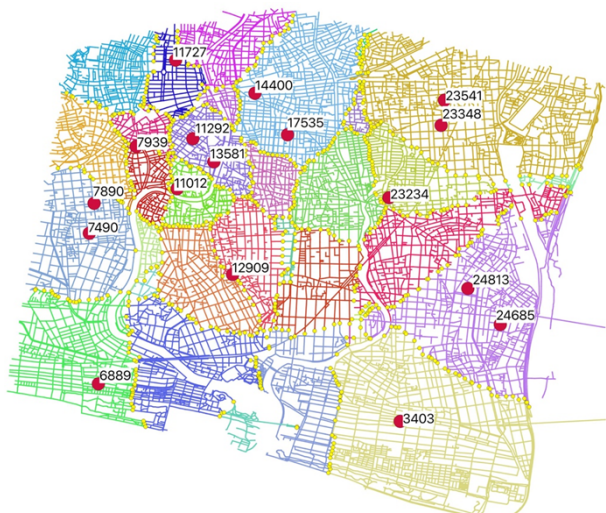


図-3 オーダ2のネットワークボロノイ図の例
($|V| = 29366$, $|E| = 34576$, $m = 17$)

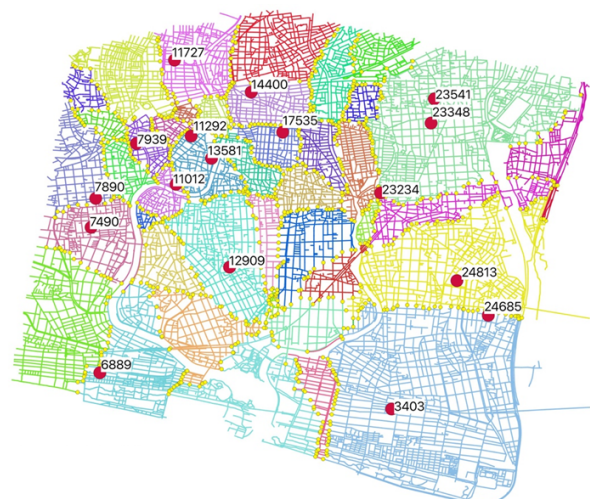


図-4 オーダ3のネットワークボロノイ図の例
($|V| = 29366$, $|E| = 34576$, $m = 17$)

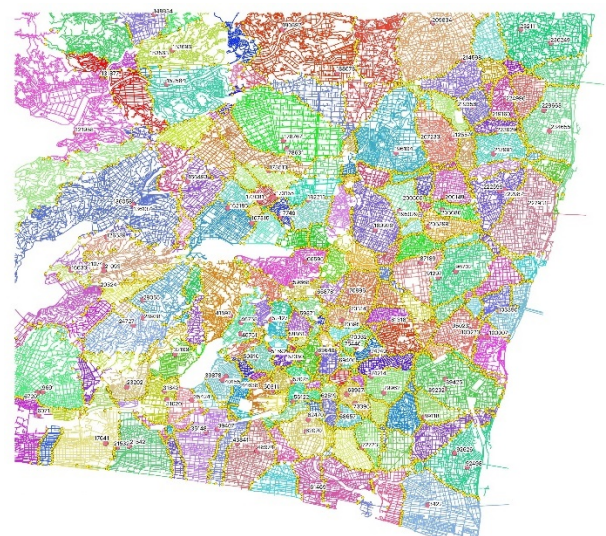


図-5 オーダ2のネットワークボロノイ図の例
($|V| = 240229$, $|E| = 269759$, $m = 117$)

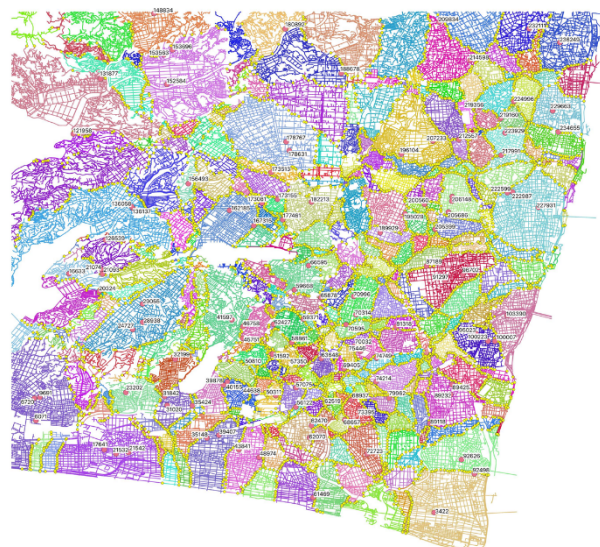


図-6 オーダ3のネットワークボロノイ図の例
($|V| = 240229$, $|E| = 269759$, $m = 117$)
(図-3～図-6では、ネットワークボロノイ領域の境界にあたる地点は黄色で示してある)

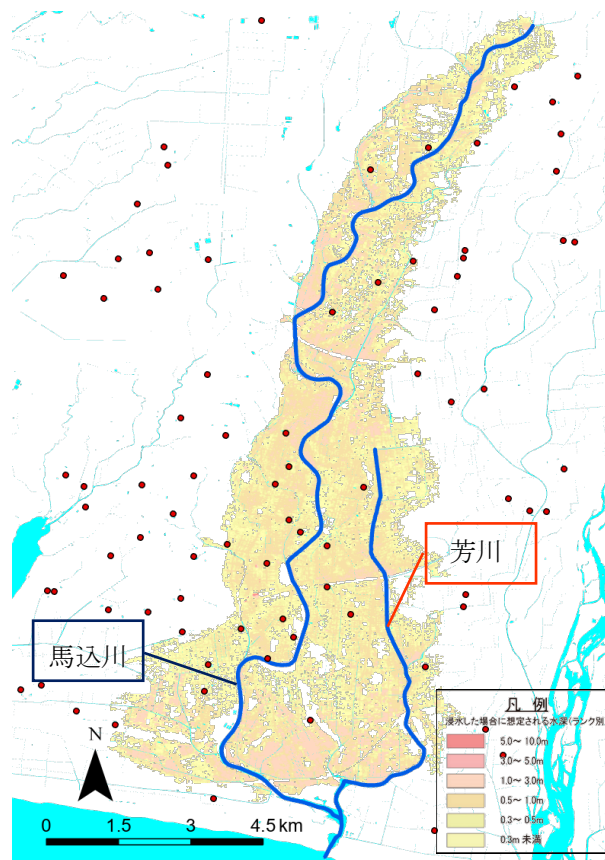


図-7 馬込川・芳川の洪水浸水想定区域図（最大想定）と指定緊急避難場所

て算出した場合の例であり、 $|V| = 240229$ 、 $|E| = 269759$ の道路ネットワークで、母点数 $m = 117$ について、それぞれオーダー 2、オーダー 3 のネットワークボロノイ図を描いたものである。

4. オーダ n のネットワークボロノイ図の応用例

図-3 から図-6 に示した通り、オーダー n のネットワークボロノイ図を得るためのツールを実装し、図示することができた。これらの図でとりあげた地域は静岡県浜松市である。浜松市には、図-7（図-5、図-6 とほぼ同じ地域を描いたもの）に示すように、低地部の市街地を縫うように馬込川と芳川の 2 河川が流れており、この両河川沿いでは、たびたび氾濫警戒情報が発せられてきた。図-7 中、点で示したものが指定緊急避難場所であり、色を付した領域は「洪水浸水想定区域」（国土交通省ほか、2017）である。この図を見ると、この地域で、浸水が想定されているところに多くの指定緊急避難場所があるとわかる。

さて、この地域については、図-5 に示した通り、オーダー 2 のネットワークボロノイ図が得られている。これと馬込川および芳川の 2 河川とを重ね合わせてみると、河川を領域内に含むボロノイ領域がわかる。河川を含む（オーダー 2 のネットワーク）ボロノイ領域では、その住民にとって最近隣もしくは 2 番目に近い避難施設のいずれかについて、そこまで住民が到達するために河川を渡ることがある。2 番目に近い避難施設を考えてもなお、避難する際に河川を渡ることがあるとすれば、水害時に脆弱な領域であるといふこともできるだろう。そこで、2 河川のいずれかを領域に含むボロノイ領域を示したものが図-8（赤で示した部分）である。これを見ると、このような領域には、河川に沿った地点はもちろんのこと、河川からやや離れた地点（たとえば、図中、△で示した地点）もあることがわかる。この図を利用すれば、水害時に早めに避難を始めるべき地区がどこかを判断することもできるだろう。

この図-8 の有効性を、別の観点から検討してみる。洪水浸水想定区域図の作成にあたっては、水害時の 10 分ごとの浸水の分布がシミュレーションされている。そこで、このシミュレーションにしたがって

浸水の分布が広がるとき、図-8 に赤で示した地区で（他の地区と比べて）早めに避難を始めるべきかを見てみる。図-9 は、図-8 の地域で水害があったとして、その最初の時点で、各避難場所を母点とするネットワークボロノイ図を描いたものである。一方、図-10 は、シミュレーションにより想定されている 20 分後の浸水の分布を与えた上で、各避難場所を母点とするネットワークボロノイ図を描いたものである。ここでは、浸水すると想定されている領域の道路は通行できないものと考え、そのような道路に該当する部分を道路ネットワークから差し引いた上で、ネットワークボロノイ図を描いてある。この図-9 と図-10 とを見比べてみると、たとえば図中に△で示した地点では、水害当初の最近隣の避難場所が 9619 番であったにもかかわらず、20 分後には浸水が広がってしまい、最近隣の避難場所が△の地点からかなり離れた 19661 番の避難場所になるということがわかる。このような地点は、オーダー n のネットワークボロノイ図が 1 つあれば、複数時点のシミュレーション結果を確認するまでもなく、おおよそ知ることができる。

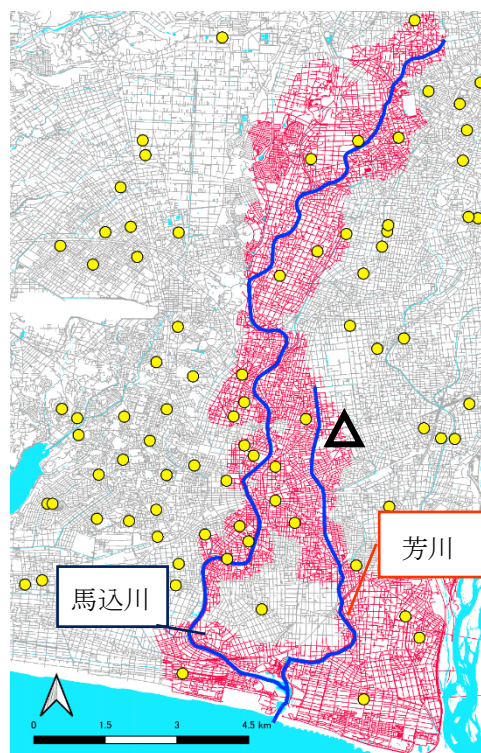


図-8 オーダ 2 のネットワークボロノイ領域のうち河川を含むもの

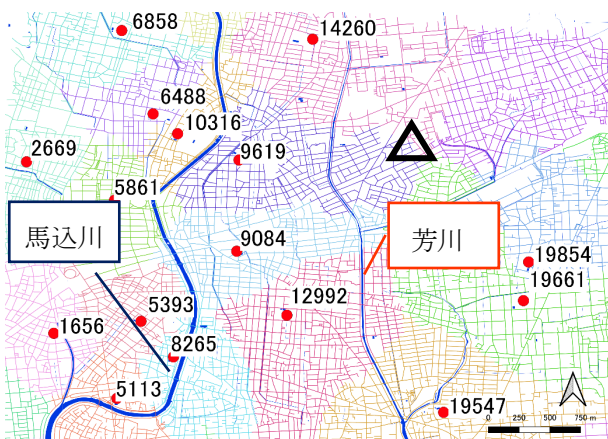


図-9 水害が始まった時点での
各避難場所のネットワークボロノイ領域

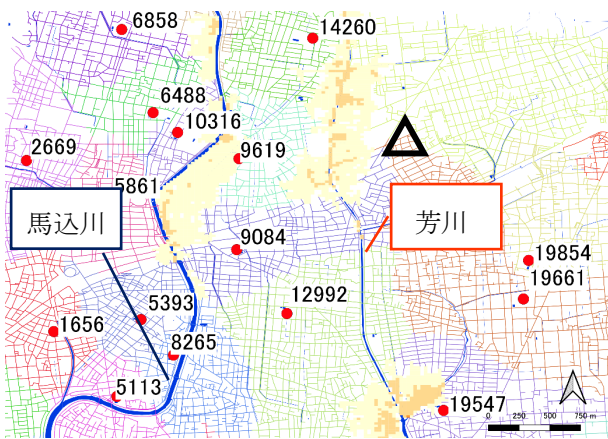


図-10 水害が始まってから20分後の
各避難場所のネットワークボロノイ領域

5. おわりに

本論文では、ネットワーク上のオーダー n のボロノイ図を描くため、Rのパッケージを利用して実装した。また、これを静岡県浜松市の道路ネットワークを例に、避難場所を母点とするオーダー n のネットワークボロノイ図を描き、その有効性を検討した。水害時にとくに早めに避難を始めるべき地区を判断するとすれば、オーダー n のネットワークボロノイ図を1つ描くだけで、この図がその判断の根拠の一つとなり得ることが本論文の検討から示唆された。

謝辞

本研究を進めるにあたり、静岡県交通基盤部河川企画課の小林大輔氏には、一般には公開されていない洪水浸水想定区域図に関するシェープファイルの

提供にご協力いただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 市川総子, 阪田知彦, 吉川徹, 2004. 建物倒壊および道路閉塞のモデル化による避難経路の危険度を考慮した避難地への到達可能性に関する研究, GIS-理論と応用, 12(1), 47-56.
- 岡部篤行, 鈴木敦夫, 1992. 「最適配置の数理」, 朝倉書店.
- 国土交通省水管理・国土保全局河川環境課水防企画室, 国土技術政策総合研究所河川研究部水害研究室, 2017. 洪水浸水想定区域図作成マニュアル (第4版) https://www.mlit.go.jp/river/bousai/main/saigai/tisiki/syozaiti/pdf/manual_kouzuishinsui_171006.pdf
- 中山大地, 森永大輔, 松山洋, 2008. 洪水氾濫シミュレーションに基づく避難経路の歩行可能性評価, 地学雑誌, 117(2), 424-438.
- A. Okabe, T. Satoh, T. Furuta, A. Suzuki and K. Okano, 2008. Generalized network Voronoi diagrams Concepts computational methods and applications, International Journal of Geographical Information Science, 22(9), 965-994.
- Binbin Lu, Huabo Sun, Paul Harris, Miaozhong Xu and Martin Charlton, 2018. Tools to Convert a Spatial Network into an Igraph Graph in R, International Journal of Geo-Information, 7(293).
- Csárdi, G., and T. Nepusz., 2006. "igraph Reference Manual" <http://igraph.sourceforge.net/doc/igraph-docs.pdf>, 2020年8月26日閲覧.
- Ickjai Lee and Kyungmi Lee, 2009. A generic triangle-based data structure of the complete set of higher order Voronoi diagrams for emergency management, Computers Environmet and Urban Systems, 33(2), 90-99.
- Pebesma, E. J., 2018. Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. The R Journal, 10(1), 439-446.