

公的統計の利活用における、オープン GIS データ

およびフリーツールの有用性と課題

—病児保育施設へのアクセシビリティ解析を例に—

富田 哲治 †

佐藤 裕哉 ‡

The application possibility of freely available spatial data
and spatial analysis systems utilizing public statistics
- Case of accessibility analysis on nurseries for sick children -

TONDA Tetsuji

SATO Yuya

本研究の目的は、病児保育施設のアクセシビリティの地域差比較を事例に、公的統計の利活用においてオープンストリートマップに代表されるオープンな GIS データ・フリーツールの有用性と課題を検証することである。アクセシビリティの評価には、始点と終点の2地点間の道路距離や移動時間が用いられている。道路距離と移動時間は、GIS ソフトウェアにより道路網データに対してネットワーク分析することで算出される。経路探索用の道路網データは商用データとして整備されており、ネットワーク分析が可能な GIS ソフトウェアの多くは商用ソフトである。市域などの小地域であれば問題ないが、大規模データの分析においては商用データの利用コストに加えて、経路探索する組合せが膨大となることによる処理時間が問題となる。本研究では、地域差比較を目的とした全国を対象とした大規模データの分析を事例に、フリーの道路網データや経路探索エンジン OSRM を利用した分析法を紹介し、その有用性と課題について検証する。

キーワード：直線距離、道路距離、移動時間、OSRM、公的統計

The purpose of this study is to examine the usefulness and problems of open GIS data and tools, such as OpenStreetMap, in the use of public statistics based on the case study on comparison of accessibility of nurseries for sick children. The road distance and travel time between the two points are used to evaluate accessibility. Road distance and travel time are calculated by network analysis of road network data using GIS software. Road network data for route search can be constructed by commercial data, and most of the GIS software to operate network analysis is commercial software. In the analysis of big data that covers a wide area, the cost of commercial data on road network becomes major problem. In addition, since a huge number of route searches

† 県立広島大学 Email: ttetsuji@pu-hiroshima.ac.jp

‡ 下関市立大学 Email: sato-y@shimonoseki-cu.ac.jp

are required, the processing time becomes a serious problem in practical use. Therefore, we introduce an analysis method using free road network data and the route search system OSRM, and discuss its usefulness and problems, through a case study of analysis for the whole of Japan for the purpose of comparing regional differences on accessibility.

Keyword: Straight line distance, Road distance, Travel time, OSRM, Public statistics

1 はじめに

本研究の目的は、公的統計の利活用に際して、オープンデータやフリーの空間解析ツールがどのくらい活用できるか検討し、使用上の注意点や課題を見出すことである。そして、その解析の例として病児保育施設へのアクセシビリティを取り上げる。

2013年のG8サミットでの「オープンデータ憲章」以降、先進国を中心にオープンデータの整備が進み、充実してきている（若林ほか編, 2017）。それらのデータの利活用を促進するためには、具体的な活用方法の蓄積が必要である。オープンデータ、公的統計を用いて安価かつ比較的簡単に距離を計算する方法を示し、そこから見出された解析上の注意点が使用上のレベルなのか、根本的なデータの問題なのかを検証することで、様々な施設等の距離計測へとつながり、研究や実務において公的統計の利活用が促進されると考える。

この点に関して増山（2017）は、OpenStreetMap（OSM）¹とQGIS、Google Maps Distance Matrix APIを用いて、弘前市人口集中地区においてランダムに発生させた出発地点、目的地点1000個ずつの地点間の移動距離と時間距離を計測することで、フリーのデータ、ソフトウェアの実用可能性について検証した。Google Maps Distance Matrix APIの無償版は1日最大2500回という制約があり、限られた時間内で2500をはるかに超えた地点間ペアの解析を行うという面で実用面での課題があること、QGISとOSMでは計測できないケースがあることや、精度の問題があることを指摘した。ここでは、大規模、広域のデータを扱う難しさが指摘されているといえる。

アクセシビリティの計測においては、施設の種類によっては、その立地数や立地の地域的偏りから市域を越えた利用も想定されることや、物流などにおいても市域や県域をまたぐ移動が行われているため、より大規模で広域的な分析が必要であろう。

また、金杉・瀬戸・関本・柴崎（2019）は、OSMとカーナビゲーションなどで利用されるデジタル道路地図（DRM）を比較し、位置の比較や網羅率を分析することでOSMデータの有用性を全国という広域で検討している。しかしながら、位置の比較で取り上げているのは高速道路（motorway）のみであること、網羅率は全道路を対象としているが、具体的にどのような使用上の課題があるかについては示されていない。

以上より、分析コストを意識し、広域を対象とした大規模データを処理する方法や、処理速度、具体的な使用上の注意点、課題などに関するさらなる手法の検討が必要であるといえる。

本研究では、病児保育施設へのアクセシビリティを取り上げたが、その理由としては、以下に示す江原の一連の研究において直線距離による距離計算が行われており、計測結果の比較が可能だからである。

病児保育施設へのアクセスについて論じた研究として、Ehara（2017）、江原（2018）などがある。しかしながら、これらの研究においては、データの制約などもあり、アクセスは施設の住居を結ぶ直線距離で計算されている。日本は山や河川が多い地形であるため、直線距離では隣接していても、道のり距離は長い場合がある。そのため、実際の利用行動を考えると、交通網を考慮し、道路距離で分析する必要がある。本研究では、Ehara（2017）および江原（2018）で利用された公的統計に基づくポイントデータに加えて、道路網のラインデータを組み合わせて統合データベースを構築し、ネットワーク分析を行うことで、実際の移動距離を算出する。

2 資料

¹ OpenStreetMap Japan, 自由な地図をみんなの手で, openstreetmap.jp

本研究で必要なデータベースは、(1)居住区の位置座標、(2)病児保育施設の位置座標、(3)道路網、の3つである。(1)には、総務省統計局(2018)が e-Stat²で公開する平成 27 年度国勢調査のオープンデータの地図データ(図 1 に広島市のデータを例示)から、居住区ポリゴンの重心座標を算出し、各居住区の位置座標として利用する。ただし、2015 年の国勢調査における人口が 0 の地区は分析対象から除外した。(2)には、全国病児保育協議会³に掲載されている全国病児保育協議会加盟施設から各施設の住所を取得し、ジオコーディングにより位置座標のポイントデータを作成する。(3)には、OSM から日本全国の道路網に関するラインデータ(図 2 に広島市中心部のデータを例示)を取得する。



図 1. 公的統計から得られる居住区ポリゴンデータの例(広島市)



図 2. OSM に基づく道路網ラインデータ(広島市中心部)

3 方法

日本全国の居住区および病児保育施設の位置座標ポイントデータ、道路網ラインデータに基づき、ネットワーク分析を適用する。ネットワーク分析は、ArcGIS などの GIS ソフトウェアでも利用できるが、あくまで市域や県域といった小地域での適用を想定したものである。

² 総務省統計局, 政府統計の総合窓口(e-Stat), www.e-stat.go.jp

³ 全国病児保育協議会, 病児保育加盟施設一覧, byoujihoiku.net

そこで、本研究では、オープンソースの経路探索エンジンである OSRM (Open Source Routing Machine)⁴を利用して、OSMの道路網ラインデータに対してネットワーク分析を行う。

ネットワーク分析における基礎的な経路探索アルゴリズムの1つにダイクストラ法 (Dijkstra, 1959) がある。ダイクストラ法は小規模なネットワークを想定しているため、道路網のような大規模データに対しては処理が遅く実用的でない。OSRMでは、大規模データ向けにアルゴリズムを改良したマルチレベルダイクストラ法 (例えば、Hamme, 2013) が採用されている。マルチレベルダイクストラ法は、前処理としてまず道路網データを分割し、分割領域をつなぐ境界頂点同士のみからなる Overlay Graph と呼ばれるネットワークを構築する。経路探索をしたい始点と終点がある領域と Overlay Graph からなるネットワークに対して、ダイクストラ法を適用することで、実用的な処理時間で経路探索を行うアルゴリズムである。

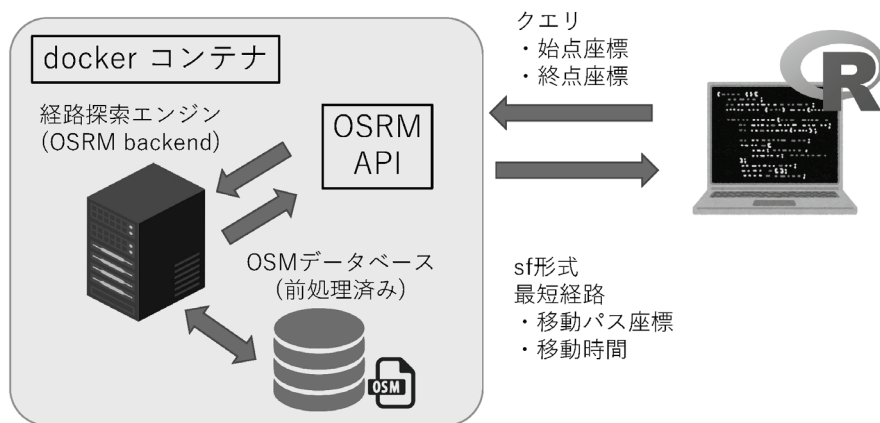


図 3. OSRM に基づく最短経路の探索システムの構築イメージ

本研究で構築した OSRM に基づく最短経路の探索システムの概略を図 3 に示す。まず、Docker コンテナ (Luxen and Vetter, 2011) を利用して OSRM backend に基づく経路探索エンジンを構築し、Docker コンテナ内で、マルチレベルダイクストラ法における前処理を実行する。その上で、R (R Core Team, 2021) の osrm パッケージ (Giraud et al., 2021) を介して、OSRM API⁵を使用して始点座標と終点座標を含む経路探索のクエリを送信する。OSRM から得られる最短経路の情報 (移動経路のパス座標、移動距離、移動時間) は、R の sf パッケージ (Pebesma, 2018) で扱える空間データの統一的な形式で取得する。OSM では道路の種類を識別するための階層⁶に対して、移動方法に関するプロファイル (道路種別毎の移動速度など) が設定されている。これにより、指定した移動方法に基づく移動時間も算出可能である。

重要となる道路網データは、GEOFABRIK⁷から入手可能である。GEOFABRIK で公開されている日本の道路網データは地区ブロック別の広範囲なものである。特定の地域の道路網データについては、Export Tool⁸のサイトから任意の指定範囲の道路網データを入手可能である。ここでは、Export Tool から広島県の道路網データを取得し、OSRM に基づく経路探索システムの構築手順を概説する。

⁴ Project OSRM, OSRM: Open Source Routing Machine, project-osrm.org

⁵ Project OSRM, OSRM API Documentation, project-osrm.org/docs/v5.24.0/api

⁶ OpenStreetMap, Key:highway, wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:highway

⁷ GEOFABRIK, OpenStreetMap Data Extracts, download.geofabrik.de

⁸ HOT, EXPORT TOOL, export.hotosm.org/ja/v3/

(1) 道路網データの取得

Export Tool でユーザー登録をしてログインすると、図 4 に示す「1 Describe」の画面が表示され、道路網データを取得する範囲を指定する。右側の地図から範囲を指定することができる。ここでは、Hiroshima をキーワードで検索した結果に基づき範囲指定をしている。必要に応じて、画面左側の項目を入力することで、後で検索結果を参照することができる。

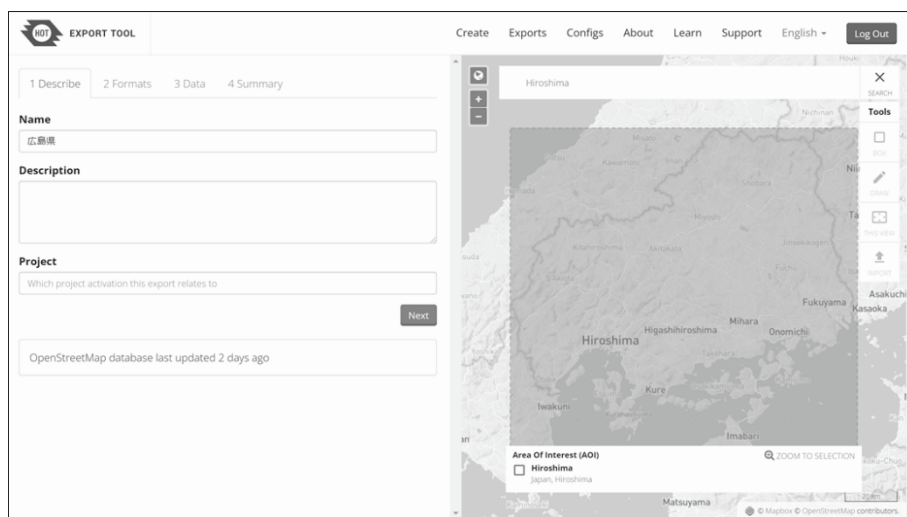


図 4. Export Tool のデータ取得範囲の設定画面

「2 Formats」では、データ形式を指定する。OpenStreetMap のデータ形式 OSM(.pbf)の他に、GIS データで標準的な shape ファイル(.shp)などの形式も指定可能である。「3 Data」では、データに含める項目を指定する。道路網の場合は、Tag Tree 内の Transportation の Road にチェックを入れる。道路網以外にも、多種多様なデータ項目がある。最後に、「4 Summary」で入力内容を確認し、Create Export をクリックすることで処理のリクエストが送信され、図 5 のような画面が表示される。図 5 の Status から処理状況を確認することができる。Status が COMPLETED となれば処理完了であり、その下にあるデータ形式別のリンクからダウンロードできる。

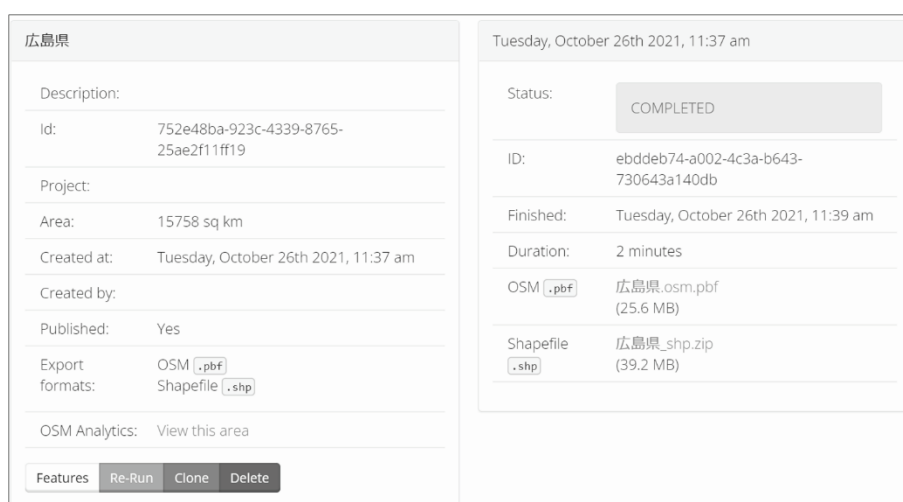


図 5. リクエストした処理状況の画面

(2) Docker コンテナによる OSRM の導入

Docker の公式サイト⁹から、Docker Desktop をインストールする。OSRM の Docker コンテナイメージは、Docker Hub¹⁰として公開されている。Docker を起動した上で、コマンドプロンプト等からコマンド「`docker pull osrm/osrm-backend`」を実行することで OSRM が導入される。

(3) OSRM における前処理

手順(1)でダウンロードした広島県の OSM 形式の道路網データファイル「広島県.osm.pbf」は、Cドライブ直下に作成したフォルダ「map」に道路網データが保存されているとし、コマンドプロンプト等でディレクトリを変更する。

```
cd c:\map
```

事前に Docker を起動した上で、以下のコマンドで「広島県.osm.pbf」に対する前処理を実行する。ここでは、車での移動時間を求めるため、プロファイルとして「car.lua」を指定している（他の移動手段として、自転車の bike.lua、徒歩の foot.lua が利用可能である）。道路網データの規模が大きいと前処理には時間がかかるが、都道府県程度であれば数分で完了する。

```
docker run -t -v "${PWD}:/data" osrm/osrm-backend
    osrm-extract -p /opt/car.lua /data/広島県.osm.pbf
docker run -t -v "${PWD}:/data" osrm/osrm-backend osrm-partition /data/広島県.osrm
docker run -t -v "${PWD}:/data" osrm/osrm-backend osrm-customize /data/広島県.osrm
```

(4) OSRM サーバーの起動

次のコマンドにより、OSRM サーバーを起動する。ここでは、経路探索アルゴリズムに mld（マルチレベルダイクストラ法）指定している。

```
docker run -t -i -p 5000:5000 -v "${PWD}:/data" osrm/osrm-backend
    osrm-routed --algorithm mld /data/広島県.osrm
```

OSRM サーバーの起動が完了すると、コマンドプロンプト等に待機中と表示される（図 6）。

```
[info] starting up engines, v5.24.0
[info] Threads: 16
[info] IP address: 0.0.0.0
[info] IP port: 5000
[info] http 1.1 compression handled by zlib version 1.2.8
[info] Listening on: 0.0.0.0:5000
[info] running and waiting for requests
```

図 6. OSRM サーバー起動後の状態

(5) OSRM API による経路探索

統計ソフトウェア R の osrm パッケージで、R から OSRM API を利用した経路探索を実行する。まず、[1]のコードで osrm パッケージを読み込み、[2]のコードで手順(4)で起動したサーバーのアドレスを指定する。次に、[3]と[4]のコードで始点と終点の情報を入力し、[5]のコードの osrmRoute 関数を[3]と[4]の情報を引数として実行する。このとき、オプションに「returnclass="sf"」を指定することで、OSRM API で取得した経路情報を sf パッケージで扱う

⁹ Docker, Get Started with Docker, www.docker.com/get-started

¹⁰ Docker, Docker Hub, hub.docker.com

空間データのデータ形式で取得する。道路距離と移動時間以外にも、移動経路の詳細な座標情報も含まれている。

```
library(osrm) # [1]
options(osrm.server = "http://localhost:5000/") # [2]
getOption("osrm.server")
src <- c([始点の ID], [始点の経度], [始点の緯度]) # [3]
dst <- c([終点の ID], [終点の経度], [終点の緯度]) # [4]
res <- osrmRoute(src, dst, overview="full", returnclass="sf") # [5]
```

4 結果

4.1 小規模データに基づく結果

まず、広島県のみを対象とした小規模データに対して、図 3 で構築した探索システムに基づき、各居住区の重心座標を始点とし、県内の病児保育施設を終点とした最短経路の道路距離および移動時間を算出する。道路距離と、先行研究で用いられた直線距離の結果を比較することで、直線距離と道路距離の乖離の特徴を検証し、オープンデータである OSM の利用における課題についても検討した。

図 7 は、広島県内の各居住区と病児保育施設との間の直線距離 (X 軸) と道路距離 (Y 軸) の散布図である。図中の直線は、切片 0 で傾き 1 の直線である。直線の上側にある点は、“道路距離 > 直線距離” となった組である。もちろん、直線距離より道路距離が長くなるのは自明である。直線距離が 20km 前後において、2 つの距離に大きな乖離を確認することができる。直線距離の差の最大は約 90km であった。これらの乖離の多くは、居住区の座標にポリゴン重心座標を代表点としたことで、代表点が道路から離れた位置となったことによる。また、直線の下側にある点は、“道路距離 < 直線距離” となった組であり、45 件確認された。本来、このような距離の逆転はありえない。そこで、これらの組について個別にその原因を調べた。

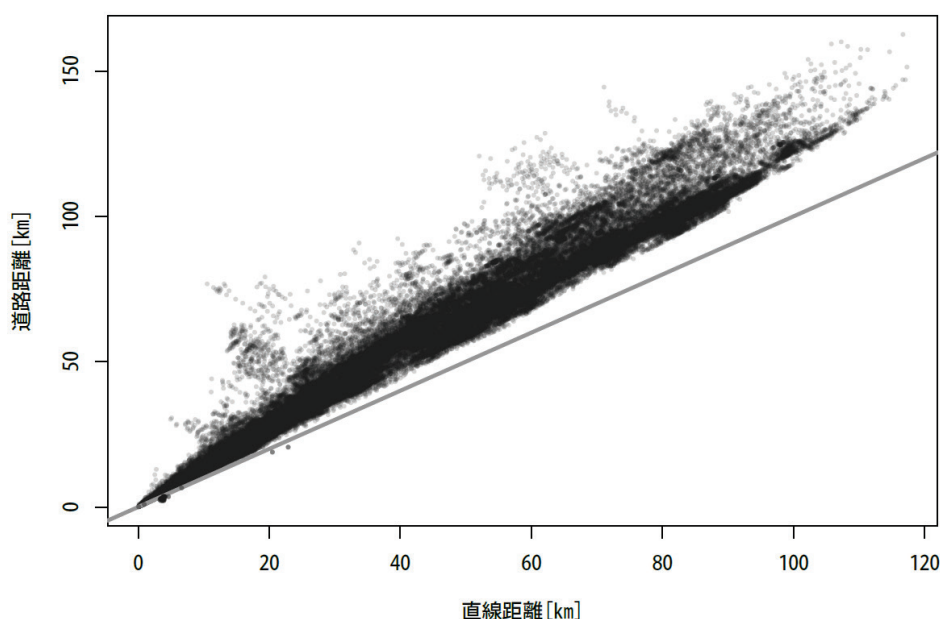


図 7. 広島県における直線距離と道路距離の比較結果

図3でも説明したように、本研究で構築した探索システムでは、道路距離と移動時間のみならず、詳細な移動パス座標も取得している。図7において確認された“道路距離<直線距離”となった始点と終点の移動パスについて個別に検証した結果、オープンデータであるOSMの課題が明らかになった。図8は、その典型的な“道路距離<直線距離”となった事例である。図8において、始点は広島県福山市にある離島の走島町、終点は福山市御幸町にある病児保育施設である。これら2地点間の直線距離22.9kmに対して、移動パスに基づく道路距離は20.6kmであった。図8から分かるように、移動パスには、航路が欠落している。これは、OSMの道路網データに航路の情報がなかったことに起因する。これにより、道路距離が直線距離より短くなってしまった。航路はOSMに反映されている場合もあるが、正確でない場合もある。この事例の他に確認された“道路距離<直線距離”の事例では、居住区の座標として用いた居住区ポリゴンの重心座標が、ポリゴン面積が大きい地域では道路から離れた地点になっていることにより、“道路距離<直線距離”となっていた。

なお、直線距離より大幅に道路距離が長く算出された事例が図9である。橋の位置の関係で道路が大きく迂回しているためである。また、町丁目の重心座標近くに一般道ではなく高速道路がある場合、始点が高速道路上となり、インターチェンジの場所の制約から大きく迂回するルートが描画されたケースもみられた。

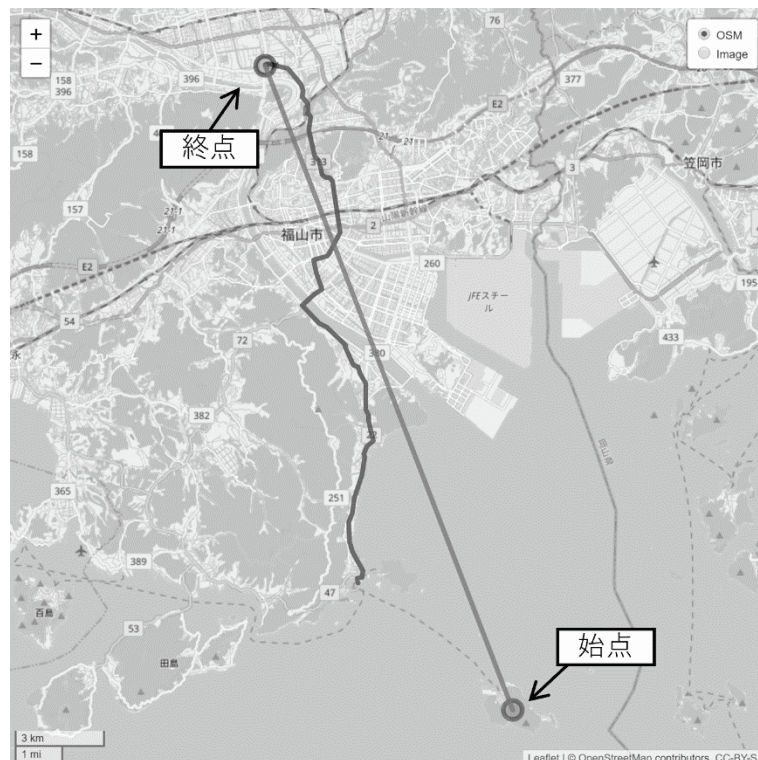


図8. 直線距離より道路距離が短く算出された事例

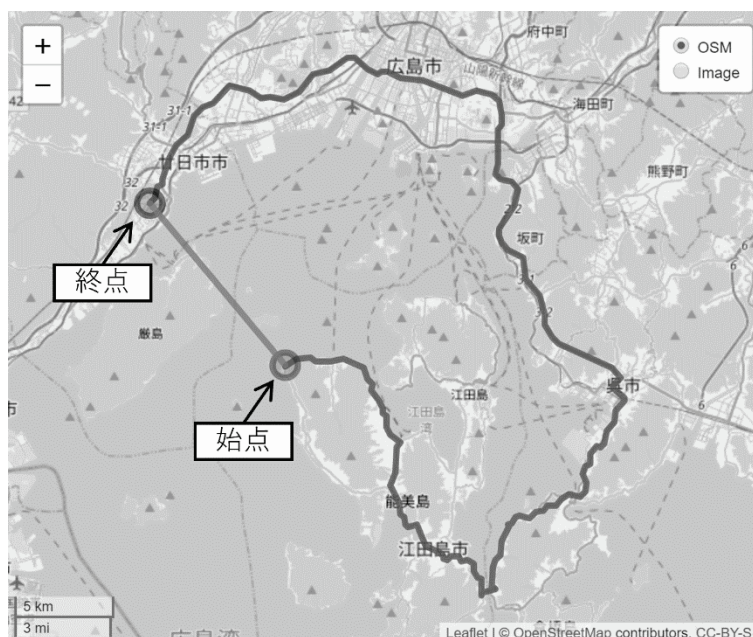


図 9. 直線距離より大幅に道路距離が長く算出された事例

4.2 全国データに基づく結果

江原(2018)では、全国の居住区から病児保育施設との直線距離を算出し、表 1 に示すように 3km、5km、10km 圏内に居住する 0～4 歳児の比率を示した。ただし、4 歳以下人口は平成 27 年度国勢調査（総務省統計局, 2017）に基づく地方別合計値である。これに対し、本研究では、OSM の道路網ラインデータに基づくネットワーク分析を行うことで道路距離を算出した。その結果を、表 1 の区分と同様に 3km、5km、10km 圏内に居住する 0～4 歳児の比率でまとめたものが表 2 である。表 2 より、日本全体（総計）では、道路距離で 3km 圏内に居住する比率は 17.2%、5km 圏内に 30.1%、10km 圏内に 49.6%であった（表 1 の直線距離では、3km 圏内が 42.9%、5km 圏内が 60.8%、10km 圏内が 78.1%）。特に、北海道や東北における比率が低く、10km 圏内でも 24%弱であった。表 1 と表 2 の差を示したものが表 3 である。10km 圏内になると、中国地方、四国地方の差が他地域より相対的に高くなる。特に中国地方が-37.6 ポイントと大きい。中国山地、四国山地との位置関係が影響していると推察される。

表 1. 各地方における病児保育施設からの直線距離 3, 5, 10km 圏内に居住する乳幼児（0～4 歳）の比率（出典：江原(2018)の p.448 に掲載の表 1）

地方	4 歳以下人口	3km 圏内	5km 圏内	10km 圏内
北海道	185,874	13.7%	24.4%	39.6%
東北	313,588	14.3%	25.4%	42.4%
関東	1,668,003	56.0%	75.4%	87.9%
中部	934,533	24.7%	42.0%	68.5%
近畿	807,000	53.9%	73.0%	88.7%
中国	299,311	38.6%	58.7%	81.2%
四国	140,750	43.4%	63.5%	80.6%
九州沖縄	634,773	45.9%	63.6%	80.1%

総計	4,983,832	42.9%	60.8%	78.1%
----	-----------	-------	-------	-------

表 2. 各地方における病児保育施設からの道路距離 3, 5, 10km 圏内に居住する乳幼児（0～4 歳）の比率

地方	4 歳以下人口	3km 圏内	5km 圏内	10km 圏内
北海道	185,874	3.9%	10.2%	23.8%
東北	313,588	5.8%	11.2%	23.6%
関東	1,668,003	25.2%	42.6%	64.2%
中部	934,533	16.1%	28.2%	50.2%
近畿	807,000	25.4%	46.0%	69.6%
中国	299,311	16.7%	26.6%	43.6%
四国	140,750	20.9%	34.6%	52.0%
九州沖縄	634,773	20.6%	33.8%	55.7%
総計	4,983,832	17.2%	30.1%	49.6%

表 3. 直線距離と道路距離それぞれの 3, 5, 10km 圏内に居住する乳幼児（0～4 歳）の比率の差（表 2 の数値から表 1 の数値を引いたもの）

地方	3km 圏内	5km 圏内	10km 圏内
北海道	-9.8	-14.2	-15.8
東北	-8.5	-14.2	-18.8
関東	-30.8	-32.8	-23.7
中部	-8.6	-13.8	-18.3
近畿	-28.5	-27.0	-19.1
中国	-21.9	-32.1	-37.6
四国	-22.5	-28.9	-28.6
九州沖縄	-25.3	-29.5	-24.4
総計	-25.7	-30.7	-28.5

次に、車で移動した場合を想定した移動時間を算出し、10 分、20 分、30 分圏内に居住する比率を地方別にまとめたのが表 4 である。アクセシビリティを評価するには、移動時間の方がわかりやすいだろう。表 4 より、日本全体（総計）では、30 分圏内に居住する比率が約 80%であることがわかる。地方別にみると、関東と近畿といった都会部の移動時間が短い傾向がある。一方、他の地方に比べて北海道と東北は、10 分、20 分、30 分圏内のいずれも比率が低かった。

表 4. 各地方における病児保育施設からの移動時間 10, 20, 30 分圏内に居住する乳幼児（0～4 歳）の比率

地方	4 歳以下人口	10 分圏内	20 分圏内	30 分圏内
北海道	185,874	21.1%	35.8%	43.9%
東北	313,588	20.8%	42.0%	54.8%

関東	1,668,003	56.0%	78.4%	89.6%
中部	934,533	47.3%	76.9%	87.8%
近畿	807,000	64.6%	86.8%	93.8%
中国	299,311	40.0%	66.5%	82.3%
四国	140,750	47.5%	65.1%	75.8%
九州沖縄	634,773	52.4%	75.9%	87.5%
総計	4,983,832	45.5%	68.8%	79.4%

5 考察

本研究では、OSRM というフリーツールを用いたアクセシビリティの解析方法を示し、病児保育施設を事例とした具体的な解析を通して、オープンデータの使用上の注意点、課題などに関する検証を行ってきた。ここでは、見出された結果をまとめ、考察を行う。

まず、大規模データにおいて膨大な数となる経路探索が実用的な処理時間で実行できることは大きな利点である。また、これまで商用データが主流だった道路網データに、オープンな GIS データを利用することで、費用コストが大幅に削減される。今回使用した道路網データは、日本のみならず、海外データも利用可能であり、国際的な研究における利活用が期待される。加えて、今回解析に使用した OSRM は、増山 (2017) が示した Google Maps Distance Matrix API のような、無償版の 1 日あたりの利用制限もない。ただし、大規模な道路網データを扱う場合には PC のメモリを多く消費する。例えば、日本全国の道路網のデータ (約 1.5GB) に対して、Docker で OSRM サーバーを立ち上げると 10GB 程度のメモリを消費した。そのため、最低でも 16GB のメモリを搭載した PC が必要である。

一方、以下の点が注意点として確認された。本研究では、各居住区の代表点に町丁目の重心座標を利用した。そのため、町丁目の重心座標近くに道路がない場合、最寄りの道路からの距離計算となるため、農村部のような 1 つの町丁目が大きな場合に大きな誤差が生じた。しかしながら、これは、今回の分析では始点を便宜的に町丁目の重心座標としたからであり、具体的な場所を始点として設定することで回避できる。また、町丁目の重心座標近くに一般道ではなく高速道路がある場合、始点が高速道路上となり、インターチェンジの場所の制約から大きく迂回するルートが描画された。この点については、OSM では道路データに階層¹¹が示されているため、条件設定で回避できる。

さらに、航路に関しては、OSM においてデータが入力されている場所とされていない場所がある。また、それがどのような基準に基づいているのかは不明である。これは、オープンデータの精度に起因する問題である。今回、小規模データとして用いた広島県は、瀬戸内海に多くの離島を有しているため、道路距離が不正確な場合が多く確認された。この点が商用データとの違いであり、離島などを多く含む地域での分析の際には注意する必要がある。これらの注意点は、人口集中地区を対象とした増山(2017)では見いだされなかったことである。

以上のような注意点はあるが、広域のデータを簡便に、低コスト (処理時間や費用など) で処理できるという面で本研究が紹介した手法は有用性が高いといえる。今後、さらなるオープンデータ、公的統計の整備が進み、新しいツールが開発されることで、公的統計の更なる利活用が進むと推察されるため、継続的に手法の検討を行い、課題を見出していくことが重要であると考えられる。

¹¹ OpenStreetMap, Key:highway, wiki.openstreetmap.org/wiki/Key:highway

謝辞

本論文の作成にあたり、建設的なご意見と有益なコメントを頂いた 2 人の査読者および編集委員の方々に深く感謝いたします。本研究の一部は、令和 3 年度県立広島大学重点研究事業学長プロジェクト（先駆的成果還元型研究）による研究助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 江原朗 (2018), 病児保育施設と乳幼児の居住地との距離に関する地方間格差, 小児保健研究, 77(5), 446-451.
- [2] 金杉洋・瀬戸寿一・関本義秀・柴崎亮介 (2019), オープンストリートマップ道路データとデジタル道路地図の比較-位置と完全性に着目して-, GIS-理論と応用, 27(1), 43-48.
- [3] 総務省統計局 (2017), 地図で見る統計(統計 GIS) : 統計データダウンロード/小地域/国勢調査/2015 年/小地域(町丁・字等別)/ 年齢(5 歳階級、4 区分)別、男女別人口/世界測地系緯度経度・Shapefile, <https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=1&toukeiCode=00200521&toukeiYear=2015&aggregateUnit=A&serveyId=A002005212015&statsId=T000849>
- [4] 総務省統計局 (2018), 地図で見る統計(統計 GIS) : 境界データダウンロード/小地域/国勢調査/2015 年/小地域(町丁・字等別)/世界測地系緯度経度・Shapefile, <https://www.e-stat.go.jp/gis/statmap-search?page=1&type=2&aggregateUnitForBoundary=A&toukeiCode=00200521&toukeiYear=2015&serveyId=A002005212015&coordsys=1&format=shape&datum=2000>
- [5] 増山篤 (2017), フリーのデータ, ツール, サービスによる地点間距離・移動時間の計算実験, GIS-理論と応用, 25(2), 15-22.
- [6] 若林芳樹・今井修・瀬戸寿一・西村雄一郎編 (2017), 参加型 GIS の理論と応用, 古今書院.
- [7] Dijkstra. EW. (1959), A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, *Numerische Mathematik*, 1, 269-271.
- [8] Ehara, A. (2017), Unequal Accessibility of Nurseries for Sick Children in Over- and Under-Populated Areas of Japan, *Tohoku J Exp Med*, 241(2), 97-102.
- [9] Giraud, T., Cura, R., Viry, M. and Lovelace, R. (2021), Interface Between R and the OpenStreetMap-Based Routing Service OSRM, Reference manual of osrm package.
- [10] Hamme, J (2013), Customizable Route Planning in External Memory, Bachelor Thesis, Institute of Theoretical Computer Science.
- [11] Luxen, D. and Vetter, C. (2011), Real-time routing with OpenStreetMap data, *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, 513-516.
- [12] Pebesma, E. (2018), Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data, *The R Journal*, 10(1), 439-446.
- [13] R Core Team (2021), R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <https://www.R-project.org/>

