

# TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

ORのための地理情報システム(GIS)ソフトウェア入門

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-08-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 渡部, 大輔 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2190">https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2190</a>

# ORのための地理情報システム (GIS) ソフトウェア入門

渡部 大輔

近年、地理空間データを総合的に管理・加工し、視覚的に表示し、高度な分析や迅速な判断を可能にする地理情報システム (GIS) に関するソフトウェアが数多く開発されている。コンピュータの高性能化による大規模なデータ分析が実現するとともに、インターネットの普及により、世界中の高精度な地理空間データを手軽に入手し分析できるようになり、地理空間データを用いた分析が多くなされている。本稿では、GIS に実装されている地理空間データを取り扱う上で有用であるさまざまな機能を中心として、空間解析を代表とする OR をベースとした数理的手法に有用である地理空間データと GIS ソフトウェアの現状について解説する。

キーワード：地理情報システム、地理空間データ、空間解析、施設配置問題

## 1. はじめに

近年の全世界的なデジタル地図の整備と、その膨大なデータを効率的に管理することができるソフトウェアの開発に伴い、位置情報を活用したサービスが数多く提供されている。位置を表すためには、日常的には地図 (図形情報) と住所・名称 (文字情報) が用いられるが、緯度・経度や座標を用いることで数値情報として取り扱いが可能となる。そして、地球における球面上の位置を、なるべく誤差が少なく平面に置き換えることが重要となる。

本稿のメインテーマである「地理情報システム」(Geographic Information System: GIS) とは、地理的位置を手がかりに、位置に関する情報をもったデータ (地理空間データ) を総合的に管理・加工し、視覚的に表示し、高度な分析や迅速な判断を可能にする技術である [1]。そして近年では、「地理情報科学」(Geographic Information Science: GIScience) が、データ収集、データベースの構築、空間分析、可視化、情報伝達にかかわる汎用的な方法を研究する学際的な分野として構築されている [2]。わが国において、大学における GIS に関する標準カリキュラム [3] の作成がなされるとともに、GIS 実習用の教材 [4] や実践事例 [5] が報告されている。さらに、高等学校における新たな必修科目として、2022 年 4 月に導入される予定である「地理総合」において、GIS を用いた実践的な教育が含められ

ている。このように、今後は高等教育のみならず、初等中等教育における GIS の利活用が進められることが期待されている [6-8]。

オペレーションズ・リサーチ (OR) において、空間解析 [9] を始めとして、施設配置問題や巡回セールスマン問題、配送計画問題など、さまざまな空間的な意思決定問題が研究されており、モデルの入力データとして位置や距離など地理空間データが多く用いられている。これまでに、プログラミングにより地理空間データを利用する方法 [10] や Google Earth を用いた地理情報の可視化 [11] が紹介されているが、ここ数年で急速にフリーの GIS ソフトの機能向上や地理空間に関するオープンデータの提供が広まったことから、これまで以上に設備面や費用面で GIS に対する敷居が低くなったと考えられる。そこで本稿では、国内外における地理空間データの入手から可視化に関するプロセスにおいて、GIS に実装されているさまざまな機能を中心として、空間解析を代表とする OR をベースとした数理的手法のための地理空間データと GIS ソフトウェアの現状について解説する。

## 2. 地理情報システムの機能

### 2.1 位置情報の管理

GIS は通常、コンピュータ、ソフトウェア、地理空間データから構成される。地理空間データは、計量的情報と属性情報で構成されている。計量的情報は、対象の定量的情報 (点の座標、線分の長さ、面分の面積など)、位相・接続・包含関係などを含んでいる。一方、属性情報は、対象の定性的情報 (地名、路線名など) や対象の定量的情報 (標高、人口など) を含んでいる。

わたなべ だいすけ

東京海洋大学

〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6

daisuke@kaiyodai.ac.jp

データの形式としては、対象とする地物を座標ベクトルによって表現するベクタ形式と規則正しく並べた微小な図形（多くは四角形）の集合で表現するラスタ形式（メッシュ形式とも言う）に分類される。ベクタ形式が一般的に利用されており、データ構造が複雑である一方、線の情報や面的情報を表現するのに適しているという利点がある。

ソフトウェアには、地理空間データを取り扱う上で有用であるさまざまな機能が実装されている。データ表示においては、適切な地図投影法を選択することで、地球上の各点に対してなるべく形や大きさのひずみが少ない表示が可能となる。さらに、空間的な関係性に基づく検索や属性検索、距離・面積の計測などの機能がある。多機能な商用ソフトウェアが多数発売されているほか、近年では、フリーウェアの機能も向上している。

## 2.2 位置情報の取得

衛星からの電波を受信することにより、緯度・経度・高度の連続観測ができる測位システムである Global Navigation Satellite System(GNSS) を用いることで、地球上での位置を取得することが可能である [12]。現在運用されている GNSS については、全世界的に位置情報の取得可能な米国の Global Positioning System (GPS, 米国) のほか、Galileo(EU), GLONASS (ロシア), 北斗 (中国) が挙げられる。日本では、準天頂衛星みちびきの運用開始により、測位精度の向上がなされた。GPS を用いて測位した位置情報を記録する GPS ロガーは、小型・軽量で安価な製品が広く販売されており、手軽に位置情報を計測・記録を行い、GIS に取り込むことが可能である。

## 3. GIS ソフトウェアの紹介

### 3.1 GIS ソフトウェアの種類

地理空間データを構成している複雑な図形情報を扱う GIS は、コンピュータ性能の進化に伴い、1970 年代より普及が進んだ。当初は大型計算機を用いる必要があったが、近年ではスマートフォンを用いた屋外でのデータ管理が行われるようになった。これまで商用ソフトが主流であったが、近年ではフリーソフトの普及が著しく進んでおり、表 1 のようにまとめることができる。いずれも主要なファイル形式の読み込みや書き出しに対応しており、基本的な機能としては遜色がないと言える。一方、商用ソフトの多くは、チュートリアルや講習会などサポートを充実させたり、大学など教育機関へアカデミック版ライセンスにより安価に提供するとともに、初学者向けのサービスを充実させ

表 1 商用ソフトとフリーソフトの比較

項目	商用ソフト	フリーソフト
主な商品	ArcGIS, SIS, MapInfo, SuperMap, 地図太郎 PLUS など	QGIS, MANDARA, Google Earth/Maps など
価格	有料（一部にフリーウェアあり）	無料（一部に商用サポートあり）
機能	多機能	限定的
PC	ハイスペック PC	一般的 PC
サポート	あり（有償）	なし
利用者	企業や行政などハイエンドユーザー主体	個人や学生などエンタープライズ層

出典：筆者作成

ている。OR で主に用いられるベクタ形式のデータを利用する上で、日本において普及している代表的なソフトウェアについて、以下簡単に紹介する。

### 3.2 主な GIS ソフトウェアの製品紹介

・ArcGIS (アーク・ジーアイエスまたはアーク・ジス) [13]

米国 ESRI 社により開発されており、GIS ソフトウェアにおいて世界最大のシェアを誇っている。特徴としては、地理空間情報を活用するための一連の機能を豊富に提供しており、汎用性が高いことから、ビジネスや公共サービス、教育など多種多様な分野・業務での豊富な導入実績がある。初学者向けのサポートが充実しているほか、日本語でも多数の解説書籍 [14-17] が出版されている。

・SIS (エスアイエス) [18]

英国 Cadcorp 社により開発されており、高い拡張性とカスタマイズ性とともデータ互換性が高く、国内外約 300 種類ものファイル形式を変換することが可能である。また、時系列データやネットワークデータの解析、各種データ集計など、高度な空間解析のツールに定評がある。

・地図太郎 PLUS (ちずたろう・プラス) [19]

国内ベンダーにより開発されており、基本的な GIS 機能を多数搭載しているながら、シンプルな操作性と低価格を実現している。背景地図として地理院地図 (国土地理院) や Open Street Map に対応し、Excel との連携や地図データの提供など、初学者向けにも使いやすい機能がそろっている。

・QGIS (キュー・ジーアイエスまたはキュー・ジス) [20]

地理技術および地理データの共有化を推進する非営利の非政府組織である OSGeo 財団により開発されており、

FOSS4G(Free Open Source Software for Geospatial)と呼ばれるオープンソースソフトウェアの一種である。多様なツールとアドオンによる拡張性が高く、商用サポートも提供されている。世界中で最も普及したフリーのGISソフトと言え、日本語でも多数の解説書籍 [21-25] が出版されている。執筆時 (2019 年末) での最新バージョンは 3.10.1 であるが、長期リリース (LTR: Long Term Release) と呼ばれる安定版は 3.4.14 である。GIS では珍しい Mac OS 対応であり、バージョンアップが年 3~4 回と頻繁に行われ機能拡充が進む一方で、バージョン間の互換性が低いことが問題として挙げられる。

・MANDADA (マンダラ) [26]

谷謙二先生 (埼玉大学) により教育目的で開発されており、Excel との連携や地図データの付属など地域統計データを地図化することに適した機能を有しており、空間検索や距離測定など分析メニューも豊富である [27, 28]。

## 4. 地理空間データの紹介

### 4.1 国内外における提供データ

3 節で紹介したソフトウェアには通常、地理空間データが付属しておらず、自分の目的に合ったデータを自分で入手する必要がある。無償である地理空間データの主なダウンロードサービスは、表 2 のようにまとめることができる [22, 29-36]。国内のデータでよく用い

表 2 主な地理空間データのダウンロードサービス

	名称	主なデータ項目
日本	国土数値情報 [29]	国土 (水・土地)、政策区域、地域、交通
	地図で見る統計 (jSTAT MAP)[30]	人口 (国勢調査)、事業所・企業統計調査、経済センサス、農林業センサス
	G 空間情報センター [31]	産官学のさまざまな機関が保有するデータポータルサイト (有償含む)
米国	国勢調査局 (US Census Bureau)[32]	人口 (国勢調査)、American Community Survey (ACS)、Economic Census
	地質調査所 (USGS)[33]	地形、生態系、エネルギーなど
世界	OpenStreetMap (OSM)[34]	建物、交通、境界、海洋・河川など
	Natural Earth[35]	交通、境界、都市、海洋・河川など
	地球地図 [36]	交通、境界、河川、人口など

出典：朝日ら [22] を基に筆者作成

られる自然環境 (海岸線、河川、標高など)、インフラ (交通網、公共施設など)、社会経済 (行政、人口など) などが提供されている。近年では、G 空間情報センター [31] というポータルサイトにおいて、無償・有償を含めてワンストップで検索することが可能となった。

海外データについては、米国を始めとして主要各国でダウンロードサービスを提供している一方、Natural Earth[35]、地球地図 [36] (更新終了、プロジェクト期間：1996~2016 年) などからも無料で入手することが可能である。また、地図版の Wikipedia とも呼ばれている OpenStreetMap[34] では、世界中のボランティアにより作成された詳細な地図を公開しており、データのダウンロードはもちろんのこと、さまざまな地物を含めた背景地図としてもよく利用されている。

### 4.2 ファイル形式

地理空間データとして流通している主なファイル形式は、表 3 のようになっている。ESRI 社が提唱した Shapefile がデファクト・スタンダードとなっており、各種ダウンロードサービスにおいても提供されていることが多い。しかし、近年のシステムの進化に対応するために、複数の新たなファイル形式が提案されている。中でも、Open Geospatial Consortium(OGC) が維持管理している国際標準かつオープンな仕様のファイル形式である GeoPackage や KML が普及しつつある

## 5. OR に使える GIS ソフトウェアの機能

### 5.1 OR 論文で用いられている GIS の機能 [37]

主要な OR 系の雑誌における GIS 関連論文 (1990 年から 2010 年までが対象) は、応用分野としては、小

表 3 主なファイル形式の概要

名称	拡張子	対応ソフト	特徴
Shapefile	shp, shx, dbf 他	主要 GIS	複数ファイル必要、容量や文字列に制約あり
geodata base	gdb	ArcGIS	データの容量や利用規模に応じて 3 形式
GeoPackage	gpkg	QGIS 他	複数種類・大容量データを格納
KML	kml/kmz	Google Maps 他	XML 形式フォーマット、GPS ロガーから出力可
OSM	osm	OpenStreetMap	XML 形式フォーマット

出典：筆者作成

表4 OR論文で用いられるGISの主な機能

機能	概要	割合
道路網での距離／移動時間の計算	地点間のネットワーク距離または移動時間の推定	47%
ジオ・コーディング	住所から座標系への変換	34%
ネットワーク属性	道路ネットワークの属性指定	27%
直線距離の計算	地点間のユークリッド距離	16%
バッファ	選択した地物からの直線距離を用いたバッファ領域の作成	16%

出典：Sarkar et al. [37] を基に筆者作成

表5 施設配置問題の計算手順

手順	対象画面	作業
1	地理空間データの入手	・使用データのダウンロード、ファイル解凍 ・適切な作業ディレクトリの設定
2	座標参照系と座標変換	・使用データの座標参照系の確認 ・座標変換により座標参照系の統一
3	対象地域内データの抽出	・使用データの対象地域の確認 ・空間検索または属性検索により対象地域内に含まれるデータのみを抽出
4	需要量データの取得	・需要点の施設利用者数などのデータを属性テーブルより入手
5	距離行列の計算	・需要点と配置候補点間の全てのペアの距離を計算
6	最適配置の計算	・上記で作成した入力データを用いて、最適化ソフトなどを用いて計算 ・最適な施設配置とその需要点への割り当ての導出

出典：筆者作成

売・物流、行政、健康・医療、交通が上位に挙げられている。そして、モデルとしては、交通・配送計画・スケジューリング、施設配置、シナリオ評価、SCM、ネットワーク設計・最適化が上位に挙げられている。

ORで用いられるGISの主な機能は、表4のようになっており、距離計算（道路距離、直線距離）や位置情報の検索（住所や道路ネットワークなど）で用いていることがわかる。また、施設配置問題を中心にORによる主要な研究成果は、GISソフトのツールとして実装されている[38]。

### 5.2 QGISによる施設配置問題の入力データ作成

施設配置問題[39]を例としてQGIS3.4による入力データの作成方法について解説する。需要点として国勢調査の町丁目単位データ（ポリゴン）、配置候補地として国土数値情報の公共施設データ（ポイント）を用いて、表5のような手順で分析を行う。以下、作業する上で注意が必要となる主な作業手順についてのみ説明する。

表6 日本における主な座標参照系の概要（世界測地系）

座標系	種類	名称	EPSGコード	主な地理空間データ
地理座標系	緯度・経度	WGS84	4326	Natural Earth GPSデータ 他
		JGD2000	4612	国土数値情報
		JGD2011	6668	国勢調査 他
投影座標系	平面直角座標系	JGD2000/	2443~	国勢調査 他
		Japan Plane Rectangular CS I~XVIII	2460	
		UTM zone 51N~55N	3097~3101	衛星写真の投影他
Web座標系	WGS84/Pseudo Mercator	3857	Google Maps OpenStreetMap 地理院地図 他	

出典：喜多[24]を基に作成

・手順2：座標参照系と座標変換

座標参照系(CRS: Coordinate Reference System)とは、地球上の地物の位置を定める基準であり、測地系と座標系を選択する必要がある。測地系とは、地球上の3次元位置を緯度、経度、標高で表すための基準を定めたものであり、地球の形状を近似する回転楕円体とその座標系で構成されている[40]。日本では、GPSの普及により2002年以降、国際標準である世界測地系を用いることとなり、日本測地系2000(JGD2000)と日本測地系2011(JGD2011)が制定された。

座標系には、緯度・経度(度)単位である地理座標系と距離(メートル)単位である投影座標系がある。QGISではEPSGコード<sup>1</sup>を用いて座標参照系を識別しており、日本で主に用いられる座標参照系は表6の通りである。施設や人口、道路などの異なるソースからのデータを用いる場合、座標参照系が異なるためにデータを重ね合わせるができないことが多々見られる。また距離計算を行う際、元データが地理座標系である場合、緯度・経度を用いて大圏距離と呼ばれる地球表面の距離計算を行うこととなることから、事前に誤差が最も少ない投影座標系を選択し座標変換しておく必要がある。国土数値情報は緯度・経度のデータであるので、適切な投影座標系、とりわけ表7のように平面直角座標系へ変換を行うことが重要である。

・手順3：対象地域内データの抽出

需要点と配置候補点に対する代表点の位置座標を求める。需要点として用いる国勢調査データは、町丁目ポリゴンデータとなっているため、表8のようにポ

<sup>1</sup> EPSGコード：EPSG(European Petroleum Survey Group)により規格化された座標参照系のコード体系。

表7 座標変換の作業手順 (QGIS3.4)

手順	対象画面	作業
2-1	レイヤー (左下)	ファイル名を右クリック →[エクスポート]→[地物の保存] を選択
2-2	ベクターレイヤーを名前前で保存	[CRS] の右側のアイコン (地球儀型) をクリック
2-3	座標参照系選択	[フィルター] に対象地域の EPSG コードを入力 →[世界の座標参照系] での [オーソリティ ID] にて同一のものを選択, [OK] をクリック
2-4	ベクターレイヤー形式やファイル名を名前前で保存 (再)	[OK] をクリック

出典：筆者作成

表8 代表点座標抽出の作業手順 (QGIS3.4)

手順	画面	作業
3-1	レイヤー (左下)	レイヤーで対象ファイルを選択
3-2	メニュー	[ベクタ]→[ジオメトリツール] →[中心点...] を選択
3-3	中心点	[入力レイヤ] に対象のファイルを選択, [実行] ボタンをクリック

出典：筆者作成

表9 距離行列作成の作業手順 (QGIS3.4)

画面	作業
5-1 メニュー	[ベクタ]→[解析ツール]→[距離マトリックス] を選択
5-2 距離マトリックス (図1)	[ポイントレイヤ]: 需要点 [対象ポイントレイヤ]: 配置候補点 [ユニーク ID フィールド]: 主キーとなるデータ項目 [出力マトリックスタイプ]: 「線形」を選択 [最近傍の点群]: 「」とすることで, 全ての点のペアが計算される. [距離マトリックス]: 右の [...] をクリックし, [ファイルに保存] を選択. [ファイルの種類] は「CSV」を選択・[実行] ボタンをクリック
5-3 CSV ファイル	距離計算の結果 [InputID]: ポイントレイヤ (需要点) の ID [TargetID]: 対象ポイントレイヤ (配置候補点) の ID [Distance]: 2地点間の直線距離 (メートル単位)

出典：筆者作成

イントデータで代表点を作成する必要がある。

・手順5：距離行列の計算 (直線距離)

直線距離を用いる場合は, 表9のような手順で, 図1のような画面での設定を行った上で計算することが可能である。一方, 現実の道路上を移動することを想定するのであれば, プロセッシングツール「ネットワーク



図1 距離マトリックスの計算設定の画面 (QGIS)

解析」を用いることで, 道路上の最短経路を導出することが可能である [4, 24].

・手順6：最適配置の計算

最適計算による出力結果に基づいて, QGISではプロセッシングツール「ベクタ解析」の「結合線 (ハブ線)」を用いることで, 施設配置の位置とその需要点への割り当てを地図上で可視化できる [24].

## 6. まとめと今後の展望

本稿では, GISに実装されている地理空間データを取り扱う上で有用であるさまざまな機能を中心として, ORをベースとした数理的手法に有用である地理空間データとGISソフトの現状について解説した。GISの標準的機能の他に, QGIS (PyQGIS) や ArcGIS (ArcPy) など Python 言語を用いた自動処理や GUI などのカスタマイズを行うことが可能である。

GISはさまざまなデータや分析手法に対応した汎用性が重要である一方, ある問題に特化した専用性の高いソフトも開発されている。たとえば, 巡回セールスマン問題では, 高速アルゴリズムを実装し, 地図上に表示するスマートフォン用アプリが公開されている [41]. データやモデルに詳しくない一般利用者にとってGISへの敷居が低くなることで, 今後より一層の普及が期待できると考えている。

### 参考文献

- [1] 国土地理院. 「GISとは…」. <http://www.gsi.go.jp/GIS/whatisgis.html> (2019/11/26 閲覧)
- [2] University Consortium for Geographic Information Science, The Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge, <https://gistbok.ucgis.org/> (2019/11/26 閲覧)

- [3] 浅見泰司, 貞広幸雄他編, 『地理情報科学—GIS スタンダード』, 古今書院, 2015.
- [4] GIS Open Educational Resources WG, CC BY-SA 4.0, GIS 実習オープン教材, <https://gis-oer.github.io/gitbook/book/> (2019/11/26 閲覧)
- [5] 鈴木勉, “空間情報を活用した GIS 演習科目実践事例,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **58**, pp. 30–36, 2013.
- [6] 碓井照子編, 『「地理総合」ではじまる地理教育: 持続可能な社会づくりをめざして』, 古今書院, 2018.
- [7] 国土交通省国土政策局国土情報課 GIS 班, 「小・中・高等学校教員向け地理情報システム (GIS) 研修プログラムについて」, [http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku\\_tk1\\_000044.html](http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudoseisaku_tk1_000044.html) (2019/11/26 閲覧)
- [8] 地理情報システム学会教育委員会編, 『授業のための GIS 教材』, 古今書院, 2017.
- [9] 貞広幸雄, 山田有穂, 石井儀光編, 『空間解析入門』, 朝倉書店, 2018.
- [10] 島海重喜, “空間データ処理入門—ポイントデータとメッシュデータの活用—,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **58**, pp. 5–11, 2013.
- [11] 石井儀光, “地理情報の可視化,” オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, **63**, pp. 35–41, 2018.
- [12] 久保信明, 『図解よくわかる衛星測位と位置情報』, 日刊工業新聞社, 2018.
- [13] ESRI ジャパン社ホームページ, <https://www.esri.com/> (2019/11/26 閲覧)
- [14] 大場亨, 『ArcGIS10 で地域分析入門』, 成文堂, 2019.
- [15] 河端瑞貴, 『経済・政策分析のための GIS 入門 1: 基礎』, 古今書院, 2018.
- [16] 河端瑞貴編著, 『経済・政策分析のための GIS 入門 2: 空間統計ツールと応用』, 古今書院, 2018.
- [17] 橋本雄一編, 『GIS と地理空間情報 五訂版』, 古今書院, 2016.
- [18] インフォマティクス, SIS ホームページ, <http://www.informatix.co.jp/sis/> (2019/11/26 閲覧)
- [19] 東京カートグラフィック, 地図太郎 PLUS ホームページ, <https://www.tcgmap.jp/soft/chizutaro> (2019/11/26 閲覧)
- [20] Open Source Geospatial Foundation, QGIS ホームページ, <https://www.qgis.org/ja/site/> (2019/11/26 閲覧)
- [21] 愛知大学三遠南信地域連携研究センター編, 『地域研究のための空間データ分析入門—QGIS と PostGIS を用いて—』, 古今書院, 2019.
- [22] 朝日孝輔, 大友翔一, 水谷貴行, 山手規裕, 『「オープンデータ + QGIS」統計・防災・環境情報がひと目でわかる地図の作り方 改訂新版』, 技術評論社, 2019.
- [23] 今木洋大, 岡安利治編, 『QGIS 入門 第 2 版』, 古今書院, 2015.
- [24] 喜多耕一, 『業務で使う QGIS ver.3 完全使いこなしガイド』, 全国林業改良普及協会, 2019.
- [25] 橋本雄一編, 『QGIS の基本と防災活用 二訂版』, 古今書院, 2017.
- [26] 谷謙二, 地理情報分析支援システム MANDARA10, <http://ktgis.net/mandara/> (2019/11/26 閲覧)
- [27] 谷謙二, 『フリー GIS ソフト MANDARA10 入門』, 古今書院, 2018.
- [28] 谷謙二, 『フリー GIS ソフト MANDARA10 パーフェクトマスター』, 古今書院, 2018.
- [29] 国土交通省国土政策局, 国土数値情報, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2019/11/26 閲覧)
- [30] 統計センター, 地図で見る統計 (jSTAT MAP), <https://www.e-stat.go.jp/gis> (2019/11/26 閲覧)
- [31] 社会基盤情報流通推進協議会, G 空間情報センター, <https://www.geospatial.jp/> (2019/11/26 閲覧)
- [32] United States Geological Survey, GISData, <https://www.usgs.gov/products/maps/gis-data> (2019/11/26 閲覧)
- [33] United States Census Bureau, Geography Program, <https://www.census.gov/programs-surveys/geography.html> (2019/11/26 閲覧)
- [34] OpenStreetMap 財団, OpenStreetMap ホームページ, <https://openstreetmap.org> (2019/11/26 閲覧)
- [35] Natural Earth, <http://www.naturalearthdata.com/> (2019/11/26 閲覧)
- [36] International Steering Committee for Global Mapping, Global Map data archives, <https://globalmaps.github.io> (2019/11/26 閲覧)
- [37] A. Sarkar, H. Ramakrishna and B. Vijayaraman, Examining the integration of operations research and GIS, 2013 Annual Meeting of the Decision Sciences Institute Proceedings, 2013.
- [38] R. L. Church, Geographical information systems and location science, *Computers & Operations Research*, **29**, pp. 541–562, 2002.
- [39] 田中健一, “施設配置の数値モデル,” 応用数理, **23**, pp. 178–183, 2013.
- [40] 浦川豪監修, 『GIS を使った主題図作成講座』, 古今書院, 2015.
- [41] W. Cook, Concorde TSP, <http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/index.htm> (2019/11/26 閲覧)