

地理情報システム(GIS)の理論と技術

EHS&S 研究センター上級研究員 兼 情報システム技術本部副本部長 久保田 英之

Keyword : GIS, 地理情報システム, 空間データ, 計算幾何学, 空間 DBMS, Ajax

1. はじめに

地理情報システム(GIS:Geographic Information System)とは、地理的位置を手がかりに、位置に関する情報を持ったデータ(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⁾。

現在では身近になったカーナビゲーションのルート検索、渋滞回避ルート、最寄りのスポット検索などの機能はGISそのものである²⁾。

日本政府は、「地図で見る統計(jSTAT MAP)」³⁾を誰でも使える地理情報システムとして公開しているほか、各府省もGISを使って各種統計データ等を公開している⁴⁾。

地方自治体では、例えば東京都が都市計画情報(用途地域、高度地区、防火・準防火地域)をGISのシェープファイルで公開する⁵⁾など、地域への情報提供のツールとして広く用いている。

海外でも公開データをGISで多彩な条件で見せている例は多い(たとえばLondon Heat Map⁶⁾)。

このように、GISは現在では広く一般的に用いられている。ここではその成り立ちと、それを支える理論・技術の一部を紹介する。

2. GISの成り立ち

GISは、1950年代に米国空軍の開発したSAGE(Semi Automatic Ground Environment:半自動式防空管制組織)(図1)⁷⁾と呼ばれる防空システムがヒントになったという⁸⁾。



図1 SAGE(Semi Automatic Ground Environment:半自動式防空管制組織)⁷⁾

1960年代、カナダの土地資源管理を目的に開発がすすめられたCGIS(Canada Geographic System)が世界で最初に実用化されたGISとして知られている⁹⁾。国土面積が広く人口分布が希薄なカナダでは、国土管理のための経費を削減すべくGISに投資したという。

CGISは、開発当初はコンピュータマッピング(computer mapping)と呼ばれ、その後空間データシステム(spatial data system)、土地情報システム(land information system)など紆余曲折の末、Geo-Information System(Geo-IS)の名称で1967年に発表された¹⁰⁾。そしてGISという用語が最初に使われたのは同じ著者による1968年発表の論文¹¹⁾である。両論文の著者はRoger F. Tomlinsonであり、彼は「GISの父」(father of GIS)と呼ばれている。

1970年代になると、ガス、水道、電力、電信電話などの公共公益企業がGISの開発に乗り出した。これら企業にとっては、地図の更新・図面書き換え等、日常業務の経費削減のためであった。

1980年代初頭には、ワークステーションで稼働する汎用型GISソフトウェアが販売された。都市計画、政策立案、日常業務の効率化・高度化に対する期待がGIS技術の発展を支えた。GISソフトウェアは現在ではパソコン用アプリケーションとして販売されているだけでなく、Webサービスとしても用いることができる。

一方、アカデミックな世界が本格的にGIS研究に乗り出すのは1980年代になってからであり¹²⁾、GISが体系的に教授される体制が整うのは1990年代に入ってからであった。

米国でGIS研究が本格的に始まるのは1988年に国家地理情報分析センタ(NCGIA:National Center for Geographic Information and Analysis)がコンソーシアムとして設置されてからである。NCGIAは1990年代のGIS研究、特に空間分析(spatial analysis)機能の強化に関する研究をリードすると共に、大学におけるGIS研究を推進するためのカリキュラム策定、大学学部レベルにおける社会科学の教育にGISを浸透させることも行った。

1991年には全米の50大学が参加したUCGIS(University Consortium for Geographic Information Science)が結成された。UCGISは地理情報科学(geographic information

science:geographic information systemと区別するためにGIScienceと表記されることがある)の確立にNCGIAと共に貢献した。

GISはGISベンダの技術開発と、アカデミックな世界での地球情報科学という学問の発展の両輪で進化してきたが、1990年代には「ツールかサイエンスか?」という議論が盛んに行われていた。

2007年に米国で設立されたUSGIF(United States Geospatial Intelligence Foundation)は理論と技術とを結びつける仕組みとして、産学官連携の方向に沿った横断的組織として注目されている。

3. GISを支える理論

3.1 計算幾何学

GIS研究の中で重要な空間分析は、扱う地理空間データによって様々なバリエーションがある。例を以下に記す¹³⁾。

- ①事象の可視化……位置情報を持ったデータを地図上に展開する(図2)
- ②サイズや形状の計測……地図上で河川の長さ、建物の高さ、公園の面積など、サイズや形状を計測する
- ③空間的関係性の把握……ある地理的条件を満たすデータを把握し、地図上に展開する
- ④最適な場所とルートの発見……旅行先への最適な移動ルート、新店舗を建てるための最適な場所などを特定する(図3)



図2 事象の可視化¹³⁾



図3 最適な場所とルートの発見¹³⁾

- ⑤パターンの検出と定量化……データのパターンを検出して定量化することにより、ホットスポットや外れ値を把握する、あるいはグルーピングする
- ⑥事象の予測……山火事がどのように広がるかなど、モデリングにより予測する

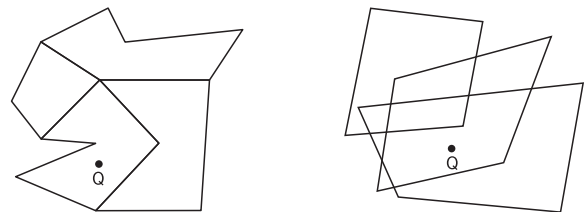
これらの分析操作では、計算幾何学の理論が使われることが多い。計算幾何学では、ある幾何学条件を満たす要素を列挙する問題を幾何学的探索問題(幾何学的問合せ問題)という。代表的なものに、点位置決定問題、領域探索問題、点包囲問題、線分交差探索問題がある(図4)。

点位置決定問題とは、対象平面がいくつかの多角形領域(ポリゴン)に分割されている場合に、ある点がどの多角形に含まれているかを判定する問題である。

領域探索問題はある多角形に含まれる点を列挙する問題、点包囲問題はある点を含む多角形を列挙する問題、線分交差探索問題はある線分と交わる線分を列挙する問題である。これらはいずれも総当たりを避けた効率的な算法が開発されている。

GISにおける空間クエリ(spatial query)は、空間情報の位置条件に基づいて地物情報を選択する操作をいい、近傍検索処理とも呼ばれ、上記の算法を利用して、ある図形に含まれる、あるいは交差する図形を抽出する処理を意味する。ある図形に完全に含まれる地物を検索する内包検索、ある図形と交差する地物を検索する交差検索、ある図形から一定距離以内に存在する地物を検索する距離検索などがある。

距離検索は、その図形から一定距離にある点を結んでできる多角形を新たに作成し、その多角形と交差検索を行う。

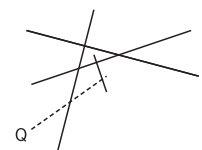


点位置決定問題
ある点Qがどの多角形領域に含まれているかを判別する

点包囲問題
ある点Qを含む多角形を列挙する



領域探索問題
ある多角形Rに含まれている点を列挙する



線分交差探索問題
ある線分Qと交わる線分を列挙する

図4 代表的な幾何学的探索問題

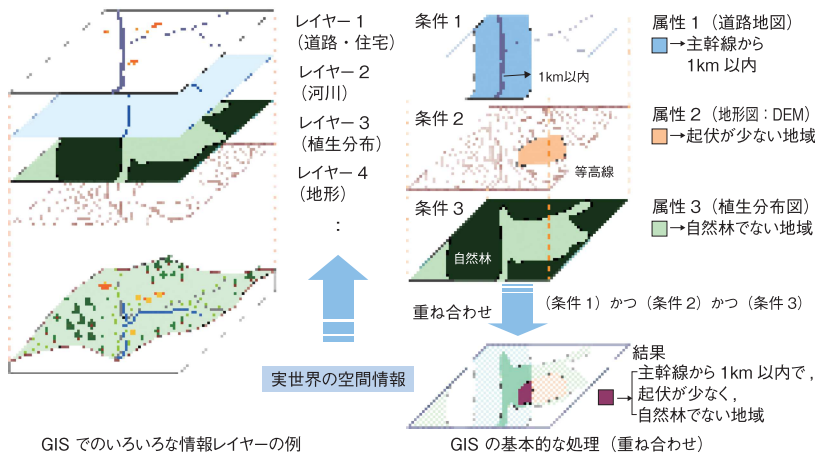


図5 GISの情報レイヤーと地理空間表現¹⁴⁾

3.2 空間データモデル

現実世界の地物群を単純化し空間概念を構築する空間モデリングで扱うデータを、空間データモデルという。

空間データモデルの情報源は、各種地図、航空写真、衛星画像、統計表およびその他関連する情報（空間データ）である。これら空間データを層状に積み重ねたレイヤー群として地理空間を表現できる（図5）。

空間データは内容によってラスタ形式またはベクタ形式として記述できる。連続的に変化する地表はラスタ形式で、離散的な地物が集まるレイヤーはベクタ形式で記述されることが多い。

ラスタ形式のデータモデルは、画像データに位置情報を付加したものであり、地表をセルに分割し、セル内の情報を数値化することで地物の位置や形状を表現している。

ベクタ形式のデータモデルは、点、線、面で構成され、位相、形、大きさ、位置、方向の幾何構造を持ち、それぞれ名前もしくはコードが付され、属性と対応する。このモデルでは、空間内挿などにより有限個の観測値から観測地点以外の任意の地点における値を推定することで新たなデータをつくり出すことも多々行われる。

現在ではデータモデルにオブジェクト指向の考え方が持ち込まれ、図形データ、属性データおよび操作（メソ

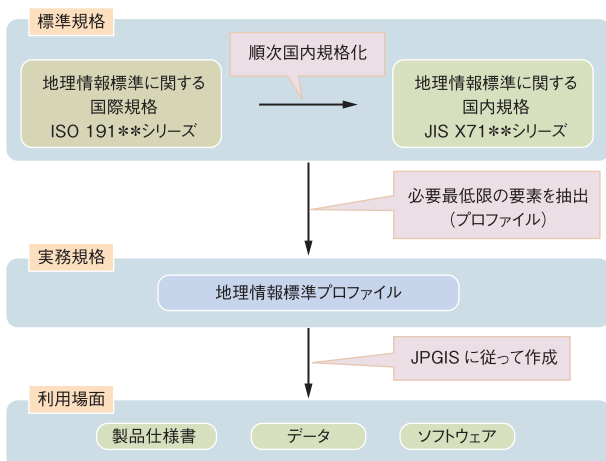


図6 地理情報標準プロファイル (JPGIS) の位置付け¹⁵⁾

ッド)の3つで地物のモデル(オブジェクト)を構成している。共通特性を持つオブジェクトをクラスと呼ぶ。オブジェクトのデータと操作はクラスによって定義されている。クラスを定義することにより、オブジェクトがどのような属性や操作を持つかを一括して定義することができる。このクラスの定義集はUML(Unified Modeling Language)のクラス図という形で表現される。

現在、日本では地理情報標準として地理空間情報プロファイル(JPGIS)¹⁵⁾が定義されている。地理情報標準は、地理

空間情報(空間データ)を異なるシステム間で相互利用する際の互換性の確保を主な目的として定められた。国内の標準は、当初ISO/TC211の国際標準案をもとに地理情報標準第1版(JSGI1.0)が作成され、その後国際標準(ISO191**シリーズ)化され、それがJIS(JIS X 71**シリーズ)化されたため、国土地理院により地理情報標準プロファイルJPGISが作成された。

なお、日本の基盤地図情報¹⁶⁾は、国土地理院によりJPGISに準拠して作成され、公開されている。

4. GISを支える技術

GISを支える技術(工学的的手法)としては、作成から利用に至るプロセスに着目すると、以下にグループ分けできる。

- ①データ取得技術
- ②データ管理・蓄積技術
- ③データ解析・最適化技術
- ④データ可視化技術

4.1 データ取得技術

地理空間情報のデータ取得は、主に計測・センシング技術により行われる。

航空写真は可視光だけでなく近赤外線や赤外線での撮影により、地形判定(測量)だけでなく植物・水路・軟弱地盤等の判別も可能である。写真測量は、2カ所から同一地点を撮影したステレオ写真をもとに3次元計測する技術である¹⁷⁾。

レーザスキャナ(レーザレンジファインダ)による測定では対象物の3次元形状を直接得ることができる。

地上に置いた地上型レーザレンジファインダでは、建物や遺跡の3次元形状を精緻に測量することができる。航空機にレーザレンジファインダを搭載した航空レーザ測量システムで地上を測量すると、精密な等高線図を得ることができる¹⁸⁾。

航空機から地上に向けて発信したレーザ光を受信する

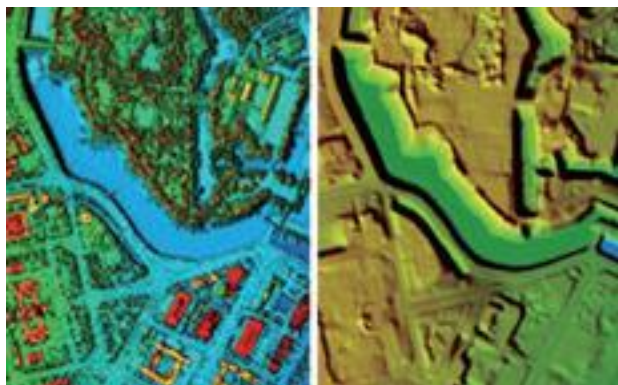


図7 DSM(Digital Surface Model)とDEM(Digital Elevation Model)¹⁸⁾

際、樹木等で反射してくる光と地表面で反射してくる光とをフィルタにより区別することで、樹木等の高さを含んだ数値表層モデル、通称DSM (Digital Surface Model) と、地表面だけの数値標高モデル、通称DEM (Digital Elevation Model) の2つを得ることができる(図7)。DEMは、樹木等を剥ぎ取った地表面の状態を様々な角度から観察できるため、例えば古墳や古城址等の立地環境や構造、残存状態を詳細に把握できる。

また、地表や大気から反射あるいは放射される電磁波を人工衛星や航空機に搭載したセンサにより観測するリモートセンシングでは、画像解析により面的に調査・分析・マッピングできる。身近なところでは、天気予報で見る気象衛星が観測する雲の動きの画像がある。

4.2 データ管理・蓄積技術

GISでは取得された位置データ、地理データ、地図データなどの空間データを管理・蓄積し、高速にアクセスできる仕掛けが必要である。ここでは蓄積する入れ物を空間データベース(空間DB)、管理しアクセスする仕掛けを空間データベースマネジメントシステム(空間DBMS)と呼ぶ。

空間DBMSは応用プログラムまたはユーザからの空間クエリ(spatial query)に対して、条件に合う空間データを出力として返すソフトウェアシステムである。

以前から事務処理用に設計されたリレーショナルデータベース(RDBMS)に代表されるDBMSは存在していたが、扱うのが文字・数字であり、空間データのような多次元数値データを扱うための特別なデータ型はサポートされていなかった。

1990年代初頭から、空間データをはじめとする高度なデータ型をサポートすべきという要求が拡大したため、従来のDBMSを拡張して、空間データが扱えるようになってきた。現在のDBMSの多くが空間データ以外にも、時間データ、テキストデータ、画像データ、ビデオデータ、HTMLデータ、XMLデータなど様々なデータ処理が行えるよう拡張がなされている。

空間データが扱えるように拡張されたDBMSでは、

表1 各DBMSの空間データベース対応

DBMS	オプション	空間データ型等
PostgreSQL	PostGIS (サードパーティオプション)	ST_Geometry
MySQL	(標準で組み込み)	OpenGIS クラス
Oracle Database	(標準で組み込み Oracle Spatial and Graph)	ST_Geometry SDO_Geometry
Microsoft SQL Server	(標準で組み込み)	Geometry Geography
IBM DB2	(標準で組み込み Spatial Extender Geometry Object)	ST_Geometry
SQLite	Spatialite	ST_Geometry

空間的な距離や関係から空間データを選択加工するクエリ(query)が使える。表1に主要DBMSの空間データベース対応についてまとめた。

4.3 データ解析・最適化技術

空間データベースを扱う上では空間インデックス(spatial index)が重要である。インデックスとは、データベースを高速にアクセスするための技術であり、従来型データベースが扱うデータは1次元(例えば住所)なので、五十音順に整列させるなどインデックス作成は比較的容易であった。

空間データベースではデータが多次元であり、例えば経緯度を、緯度順、経度順などで並べると使いにくいインデックスになるのでメッシュで考えることが多い。ここではわかりやすいように2次元で考えるが、考え方は3次元以上の高次元へ拡張可能である。

メッシュとは現実空間を一定の距離で矩形に区切ったものである。例えば、地域メッシュコード(JIS X 0410-2002)は、1次メッシュが北緯方向、東経方向に約80kmごとに区切った矩形範囲、2次メッシュは1次メッシュを北緯、東経方向に8分割、2次メッシュを10分割したのが3次メッシュである¹⁹⁾。

メッシュを使うことにより、空間データの絞り込みを容易に行える。空間データが点データであり経緯度を持っていれば、簡単な演算でどのメッシュに属しているか簡単に判定できる。空間データが領域データであり、その範囲が経緯度の範囲でわかっているならば、その属するメッシュ(単数もしくは複数)を絞り込むことができる。このように、メッシュはインデックスの役割すなわちデータベースへの高速アクセス効果が期待できる。

データの分布によっては、特定のメッシュにデータが偏ることがあり、その場合には等間隔のメッシュでは非効率となる。そのような場合に用いられる分割が4分木である。4分木は矩形範囲を縦横それぞれ2等分、つまり面積としては4分割し、さらに1/4となった矩形範囲を同様に4分割するというように、再帰的な4分割を、最小矩形範囲に含まれる空間データの数が定数以下

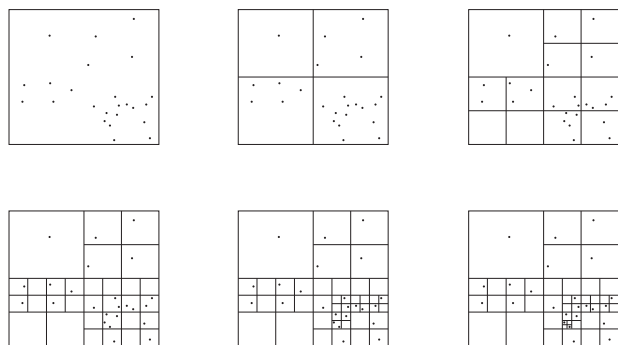


図8 4分木の空間範囲の再帰的分割の例²⁰⁾

になるまで繰り返してつくられる空間データのインデックスである。

4分木は分割単位が一定間隔であるが、データがばらばらな場合には再帰分割の繰り返し回数が異なるため検索速度が不均一となる。そこで分割する部分を変えるようにしたものととしてkd (k-dimensional) 木が知られている。

それ以外の高速化技術としては、代表図形による高速化技法がある。自由な形状の多角形図形に対して、それを包む最小の矩形 (minimum boundary rectangle: MBR (最小外接矩形)) を代表図形とし、重なり判断の際にまずこのMBRに対して判断する。MBRに重なりがあった場合にのみ、多角形同士の重なり判断の処理を行う。大量の空間データを処理する場合、代表図形を用いて粗く早く候補を絞り込むことで高速化する。

いずれの手法も、空間範囲の分割によってインデックスとしている。

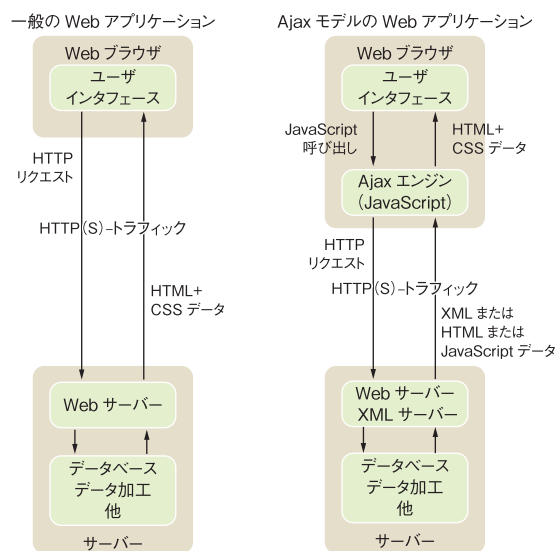
4.4 データ可視化技術

GISにとって地図は、人が直感的にデータを引き出したり重ね合わせたりするための操作インタフェースとして機能すると共に、測量や観測から得られ保存された地理空間データから抽出されたデータの表現の場としても使われている。今や平面的な地図だけでなく、立体的な地球儀のような表現²¹⁾ がされることもある。

このような可視化技術は日々進歩し、クライアントアプリケーションプログラムとしての実装については網羅しきれないため、本稿ではWebアプリケーションとしてGIS相当のものを初めて実装したGoogleマップ²²⁾ (Google Maps) の基礎技術について述べる。

Googleマップのサービスは2005年2月に開始された。2005年9月のハリケーン「カトリーナ」の余波を受けてGoogleマップはニューオーリンズの衛星画像を素早く更新し、その都市の様々な場所で洪水の範囲を確認できるようにしている。Googleマップが単なる地図サービスではなくGISらしさを発揮した実例である。

GoogleマップサービスのフロントエンドはAjaxと呼ばれる通信方式である。AjaxとはAsynchronous



文献²³⁾を基に作成

図9 従来型WebアプリケーションとAjaxの比較

JavaScript and XMLの略称で、非同期 (Asynchronous) にXML (Extensible Markup Language) で書かれたデータを、JavaScriptを使ってやり取りする、ということを表している。利用者は、Webブラウザ上でその操作に応じて刻々と変化する画面を (画面の再表示なしに) 見ることができる。

技術としては、XMLHttpRequest (HTTP通信を行うためのJavaScript組み込みクラス) による非同期通信を利用し、通信結果に応じてダイナミックHTML (DHTML) で動的にページの一部を書き換えるというアプローチを取る (図9)²³⁾。

使っている技術は、単体ではその時点でも特に新しいものではなかったが、これらの一連の技術をJesse James Garretが2005年2月18日に書いたコラム²³⁾で「Ajax」と呼んだことから、この技術が世界中に一気に広まった。

これ以降、Webアプリケーションの適用範囲がGISに限らず大きく広がったという点でAjaxの意義は大きい。

5. おわりに

本稿では、GISの成り立ちとそこで使われている理論、技術のほんの一部を紹介した。GISは今やあらゆる分野で使われていて、そこに使われる理論・技術も様々であり、進歩も早いので、ここでは基礎・基本となるものだけ紹介した。広く参考となれば幸いである。

[参考文献]

- 1) 国土地理院 : <https://www.gsi.go.jp/GIS/whatisgis.html>, 2021.5.2
- 2) 株式会社パスコ : <https://www.pasco.co.jp/recommend/word/word069/>, 2021.5.2
- 3) 総務省統計局 (独立行政法人統計センター) : <https://jstatmap.e-stat.go.jp/jstatmap/main/login.html>, 2021.5.2
- 4) 内閣官房 : <https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gis/link.html>, 2021.5.2
- 5) 東京都都市整備局 : <https://catalog.data.metro.tokyo.lg.jp/dataset/t000008d0000000028>, 2021.5.2
- 6) ロンドン市 : <https://maps.london.gov.uk/heatmap>, 2021.5.2
- 7) Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology : <https://www.ll.mit.edu/about/history/sage-semi-automatic-ground-environment-air-defense-system>, 2021.5.2
- 8) 碓井照子, 地理情報システム教育を目指して (「奈良大学文学部地理学教室編 地理学の模索」収容), pp.55~69, 地人書房, 1989
- 9) ESRI : <https://www.esri.com/news/arcnews/fall12/articles/origins-of-the-canada-geographic-information-system.html>, 2021.5.2
- 10) Roger F. Tomlinson : An Introduction to the Geo-Information System of the Canada Land Inventory, 1967, Canada Department of Forestry and Rural Development, Ottawa, Canada (<https://gisandscience.files.wordpress.com/2012/08/3-an-introduction-to-the-geo-information-system-of-the-canada-land-inventory.pdf>), 2021.5.2
- 11) Roger F. Tomlinson : A Geographic Information System for Regional Planning, Papers of a CSIRO Symposium, edited by GA Stewart, pp.200~210, 1969 (https://gisandscience.files.wordpress.com/2012/08/1-a-gis-for-regional-planning_ed.pdf), 2021.5.2
- 12) 碓井照子 : 英米におけるGIS研究とその応用的利用, 奈良大学紀要23号, pp.123~132, 1995 (http://repo.nara-u.ac.jp/modules/xoonips/download.php?file_id=1302, 2021.5.2)
- 13) ESRIジャパン : <https://www.esri.com/products/arcgis/arcgis-capabilities/spatial-analysis/>, 2021.5.2
- 14) 升本眞二 (大阪大学) : 地球科学におけるGRASS GIS入門, <http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/~masumoto/vuniv99/gis01.html>, 2021.5.2
- 15) 国土地理院 : 地理情報標準プロファイル (JPGIS), <https://www.gsi.go.jp/GIS/jpgis-jpgidx.html>, 2021.5.2
- 16) 国土地理院 : 基盤地図情報サイト, <https://www.gsi.go.jp/kiban/>, 2021.5.2
- 17) ESRIジャパン : 写真測量, <https://www.esri.com/gis-guide/imagery/photogrammetry/>, 2021.5.2
- 18) 国土地理院 : 航空レーザ測量の仕組み, https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/Laser_senmon.html, 2021.5.2
- 19) 久保田英之 : 土地・建物等位置のコード付与手法, NTTファシリティーズ総研レポート, No.31, pp.20~27, 2020.6
- 20) 柴崎亮介・村山祐司編, 有川正俊著 : GISの技術, 初版, 6.3, pp.105~114, 朝倉書店, 2009
- 21) Google Earth : <https://earth.google.com/web/>, 2021.5.2
- 22) Googleマップ : <https://www.google.com/maps/>, 2021.5.2
- 23) Ajax : A New Approach to Web Applications: Jesse James Garrett, Adaptive Path, <https://immagic.com/eLibrary/ARCHIVES/GENERAL/ADTVPATH/A050218G.pdf>, 2021.5.2 (オリジナルは<http://www.adaptivepath.com/publications/essays/archives/000385.php>であるが, 会社買収によりオリジナルページは消滅している)



くぼた ひでゆき
久保田 英之

EHS&S 研究センター上級研究員 兼 情報システム技術本部副本部長 兼 DBソリューション部長
情報システム, 情報セキュリティ, ファシリティマネジメントのコンサルティングに従事
工学博士, 技術士(情報工学部門, 総合技術監理部門), 情報処理安全確保支援士(第005832号), 認定ファシリティマネジャー

Synopsis

Theory and Technologies of Geographic Information System (GIS)

Hideyuki KUBOTA

The Geographic Information System (GIS) comprehensively manages and processes data with location information (spatial data) based on geographic locations, and displays them visually, enabling advanced analysis and quick decisions. As a familiar example, it is used for car navigation systems and is also widely used by the national and local governments as a tool for information disclosure and provision. There are many cases in which public data are available in a variety of formats using GIS overseas.

GIS, which was developed for the purpose of land resource management in Canada in the 1960s, has spread for practical purposes, and has become widely used owing to downsizing and enhanced performance of computers. On the academic side, however, since research began belatedly in the 1980s, there was once an argument over whether "GIS is a tool or a science."

Spatial analysis, the most important function of GIS, has many variations, but its operation is often based on the theory of computational geometry.

GIS requires spatial data modeling of features of the real world. The information sources of the spatial data model are maps, aerial photographs, satellite images, statistical tables, and other relevant data. These are layered to represent the geographical space as a layer group.

The ISO 19100 series was established to standardize the data model, and in Japan, this became the JIS X 7100 series, from which the Geospatial Information Authority of Japan created the Japan Profile for Geographic Information Standards (JPGIS).

GIS is supported by data acquisition technology, data management and storage technology, data analysis and optimization technology, and data visualization technology. The data acquisition technology includes photogrammetry, laser survey, and remote sensing. The mainstream of data management and storage is to use the existing relational database (RDBMS) after expanding it to allow for handling of spatial data. The key to data analysis is the index technology. Spatial data are indexed by dividing the spatial range. The scope of data visualization technology is wide. This paper focuses and introduces Ajax, which has brought innovation to web presentation.