

## 特集：地域診断・症候サーベイランスに向けた空間疫学の新展開

### 空間疫学と地理情報システム

中谷友樹

立命館大学文学部地理学教室・立命館大学歴史都市防災研究センター兼任

### Spatial Epidemiology in Geographic Information System Environments

Tomoki NAKAYA

Department of Geography, Collage of Letters  
and

Research Center for Disaster Mitigation of Urban Cultural Heritage,  
Ritsumeikan University

#### 抄録

健康に対するリスクに対処するために疾病・健康水準の地理的分布を解析する環境として、GISは空間疫学研究の支援に広く利用されている。本稿では、まず、Snowのコレラマップを題材にGISの基礎的な処理概念を導入する。続けて、(1) 広域的な環境モニタリングによる健康リスクの把握、(2) 微視的な都市景観と健康との関係、(3) 社会的な格差としての健康水準の地理的格差、(4) 「時空間」という多次元空間での疾病の挙動、といった「地理空間の中の健康」に関する今日的な話題を中心に、空間統計学・地理的視覚化技術を用いた「ヘルスリスクを地理的に視る」空間疫学のアプローチを展望し、GISと空間疫学の効果的な融合の意義とその運用に関する課題を論じる。

キーワード： 地理情報システム (GIS), 空間疫学, 疾病地図, 地理的視覚化, 空間統計学

#### Abstract

As valuable environments of geographic data analysis, Geographic Information Systems (GISs) have been widely employed to assist research activities of spatial epidemiology, an (re) emerging field analyzing geographic distribution of health and diseases in order to find effective measures coping with various health risks. After introducing the basic processes of geographic information in a standard GIS environment by using John Snow's historical Cholera map, we briefly review contemporary issues of integrated usages of GIS and spatial epidemiology conducted for various fields including (1) environmental monitoring of health risk in large geographic extents, (2) evaluation of relationships between urban landscape and human health at a finer geographic resolution, (3) revealing geographic inequality of health as an aspect of social inequality, (4) tracking diseases and health risks in space-time domains. We discuss the usefulness and challenges of the integration that provides enhanced geographic knowledge and understanding of 'health in geographic spaces' through advanced geo-visualisation and spatial analysis.

**Keywords:** Geographic Information System (GIS), spatial epidemiology, disease mapping, geographic visualisation, spatial statistics

---

〒603-8341 京都市北区小松原北町58  
58 Komatsubara Kitamachi, Kita-ku, Kyoto 603-8341, Japan.  
Email: nakaya@lt.ritsumeik.ac.jp

## 1. 緒言

地理情報システム (Geographic Information System: GIS) は、様々な情報を地理的位置に基づいて統合・管理し、さらには情報を地理的に視覚化・解析する環境をもたらす情報システムである<sup>1-2)</sup>。現代の生活には、飲食店の検索が可能なインターネット上の電子地図や、撮影した位置が記録された携帯電話のデジタルカメラ画像、建物1つ1つを見分けられる空中写真のような衛星画像など、電子的に記録された地理的な位置を参照する情報 (地理情報) が数多く浸透している。GIS はこれら多様な地理情報を統合し活用する地理情報関連技術のコア (核) 技術であり、業務管理、意思決定支援、データ解析、コミュニケーションの手段として多くの分野で活用されている。

健康リスクに対処するために疾病・健康水準の地理的分布を解析する空間疫学<sup>3-4)</sup>においても、GIS は作業支援環境として広く利用されており<sup>5-7)</sup>、空間疫学研究の今日の発展には、GIS とその関連技術、および地理情報の基盤整備が大きな貢献をなしてきた<sup>8-9)</sup>。本稿では、GIS の基礎的な処理概念とともに、現代的な空間分析技術と GIS を融合させた「ヘルスリスクを地理的に視る」空間疫学のアプローチを紹介し、その意義と課題を簡潔に論じてみたい。

地理空間の中に健康を規定する要因を求める医学的見地は、古代ギリシャのヒポクラテスによるテキスト「大気、水、場所について」<sup>10)</sup>にみられるように古くから存在する。しかし、健康を支える、あるいは健康を損なう地理的空間の存在とその内容を具体的に問うには、疾病地図という空間疫学の分析手段の発明を待つ必要があった。疾病地図とは、疫学的な統計情報を地理的に可視化したものであり、19世紀中葉に作成された John Snow のコレラマップ<sup>11)</sup>は、その嚆矢と位置づけられる。Snow はコレラ菌発見以前に、当時の趨勢的な意見に反してコレラの病原体説および水系感染説を唱え、その証左とするべく疾病地図を作成した。とりわけ Soho 地区でのコレラ患者の発生分布と水道ポンプの分布図を、都市図に重ねて表示した疾病地図は、空間分析一般の古典としても名高い。コレラ患者はブロードストリートの水道ポンプの周囲に集中して分布しており、Snow が当時未知であった病原体に汚染されたと推論するブロードストリートの水道ポンプは、この患者分布の中心に位置していた。Snow が持論の確証のために作成したこの疾病地図が語る内容はあまりにも明瞭であり、空間的分布から流行対策の鍵を導き出す「空間分析」の可能性を明らかにしたのである。

Snow のコレラマップが出現しえた文脈性に注意すると、次の3点を指摘しうる。第1に近代的な測量技術を用いた市街図の完成と普及、第2に主題図という分析的な地図学の成立、第3に社会統計の整備と利用に向けた社会的機運の高まりである。

19世紀の西欧では近代的な測量技術に基づいた地形図

が公的に整備されるとともに、また大縮尺の都市図も多数作成され、コレラマップを作成する基盤図 (ベースマップ) を得ることは容易であった。この時期は地図学の飛躍的な発展がみられた「黄金時代」であり、多くの疾病地図が描かれた他<sup>12)</sup>、地質図や等温図、貧困など特定の主題項目に絞った分析的地図 (主題図) が相次いで発表された<sup>13)</sup>。主題図は、この時代の科学的方法論上のイノベーションと位置づけることもできる。また、英国では19世紀初頭には国勢調査も実施され、社会統計の政策的有効性が追及される中、William Far による人口動態統計の整備は、Snow にして死亡票を利用した地図作成を可能たらしめた社会的な情報基盤の整備であった<sup>14)</sup>。

Snow がコレラマップを発表した空間疫学の黎明期と GIS 時代たる現代には、空間疫学研究の推進に関連した幾つかの対応関係が見出せる。第1に、電子的な地理情報基盤の整備、第2に空間分析の方法論的発展、第3に地理情報の効果的な政策運用の推進である。

GIS の発展は単なる処理環境のみならず、地理情報の社会的な普及・拡充と不可分に結びついている。先進諸国では多くの電子化された地図が流通しており、日本では「GIS 法」とも呼ばれる「地理空間情報活用推進基本法」(NSDI 法) (2007年5月公布、8月施行) が、高精度な電子的基盤地図とこれに関連する情報を、国・地方自治体が計画的に整備・提供する方針を定めることとなった。電子化された地図および統計類は、高度に洗練された空間データ解析、空間的数理モデリングを用いた効果的な運用が可能である。これらはとりわけ迅速な危機対応や地域計画において、地域的な状況に依拠した政策の策定・評価の高度化に資することが期待され、この観点は具体的な目標を定めた地域的な計画実施を謳う「健康日本21」のような近年の健康政策の方向性<sup>15)</sup>とも呼応する。

こうした背景のもと、健康に関する地理情報を分析的に処理する GIS 環境と空間疫学の融合は (より広くは「保健医療のための GIS 研究」は)、健康の空間分析という取り組みを発展的に継承し、地理空間と健康の関係を再評価する機会をもたらした。

以下本論では、GIS と地理情報処理の基本的な原理と空間疫学における有用性、さらには空間疫学の方法とこれを通して明らかにされる「地理空間の中の健康」研究の動向を紹介し、GIS 時代の空間疫学の意義と課題の整理をもってまとめることとしたい。

## 2. Snow のコレラマップと地理情報処理

データ解析環境としての GIS は、(a) データの地理的視覚化、(b) 効率的な地理情報の統合・管理、(c) 空間データの演算を、同一の環境下で可能とする。GIS のルーツには様々な動機付けと技術的取り組みがあるが<sup>1)</sup>、1960年代に主として米国で推し進められた、(i) コンピュータ・マッピング研究、(ii) 自動的な住所データの情報処理を可能とする地理情報基盤整備、(iii) 地理的な意思決定支

援法としての地図の重ねあわせ（オーバーレイ）法と空間演算概念の発達は、いずれも現代的な GIS 環境を特徴づける機能として継承されている。

これらの機能がもたらすデータ解析環境としての GIS の基本的な仕組みと空間疫学に必要な地理情報処理の関係の説明に、疫学の古典的な事例であるとともに、データ解析における空間的視覚化、分布情報の統計的解析の古典<sup>16-17)</sup>とも位置づけられる Snow の疾病地図研究は、ふさわしい題材を提供する<sup>5,7,12)</sup>。

2.1 レイヤ・モデルとコンピュータ・マッピング

地理情報は、現実の地理空間に存在する人、道路、行政単位など地理的な実体（entity）をモデル化したものであり、地理的事物の個々について、地理的な座標から構成される空間情報と、この事物の状態に関するデータを保持する属性情報の2つをもって定義される。

GIS では分析の目的にあわせ、道路網や患者分布のように地理情報をその種類に応じて分類し、それぞれを別々のレイヤ（層）として管理する。図1は、Snow のコレラマップが表現した地理空間を、水道ポンプ、患者、街区、Soho 地区の範囲の各レイヤに分解して示した状況を示している。レイヤ群は、共通する地理座標空間の中で定義づけられており、図中には、汚染が疑われたブロードストリートポンプの位置を垂直方向に伸びる線で示してある。レイヤを目的にあわせて選択し、これを重ね合わせることで、多様な目的にあわせた2次元あるいは3次元の地理空間の表現モデル（地図）がコンピュータ上に作られる。このレイヤの束をレイヤケーキと呼ぶ。

GIS を特徴づける機能の1つは、属性情報に基づいて分布図を作成するコンピュータ・マッピングである。この機能により、表形式の情報の羅列に埋もれている地理的な分布特性が明らかにされる。具体的には、属性情報に応じて、空間情報である点、線、面の図形的シンボル表現を指定する。例えば、図2では、コレラ患者（死亡者）の出した家屋の位置が空間情報、家屋のID（識別番号）と死亡数が属性情報となっており、属性情報の死亡数に比例した大きさの円シンボルを地図上に表示している。表形式で示された属性情報の統計表には、各行（レコード）が1軒の家屋に対応しており、たとえば ID4番の家屋では死亡数（DEATHNUM）が2名とわかる。この ID4番に対応する地理的座標は矢印が指し示す地図中の地点であり、ここに死者数2名に対応した大きさの円シンボルが表示されている。

統計情報を地図シンボルにおきかえる方法は多様であり、その方法によって分布に対する印象は大きく変わってしまう場合がある<sup>18-19)</sup>。GIS はこの問題を全て解決するわけではないが、階級区分やシンボルの大きさなど地図表現設定を対話的に進める環境により、煩雑な地図表現上の意思決定を支援してくれる。

また、属性情報は、通常のリレーショナル・データベースの仕組みを利用して管理される。そのため、市区町村コードのような地理的事物の識別コードを空間情報に対応づけておけば、このコードを共通して持つ表形式のデータ群は、いつでも空間情報と結びつけ地理的に視覚化できることになる。

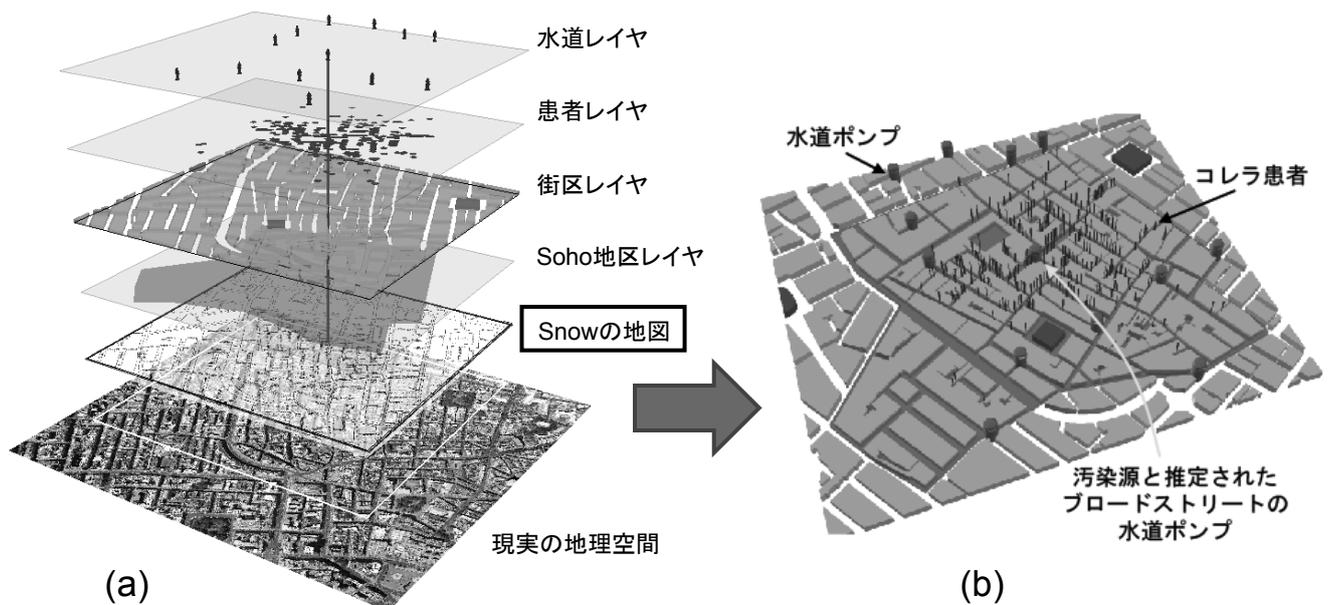


図1 Snow のコレラマップの GIS データ  
 (a) Snow の原図から得られる GIS レイヤ, (b) GIS によって描かれた Snow のコレラマップの鳥瞰図  
 出典：(b)については中谷 (2007)<sup>33)</sup>

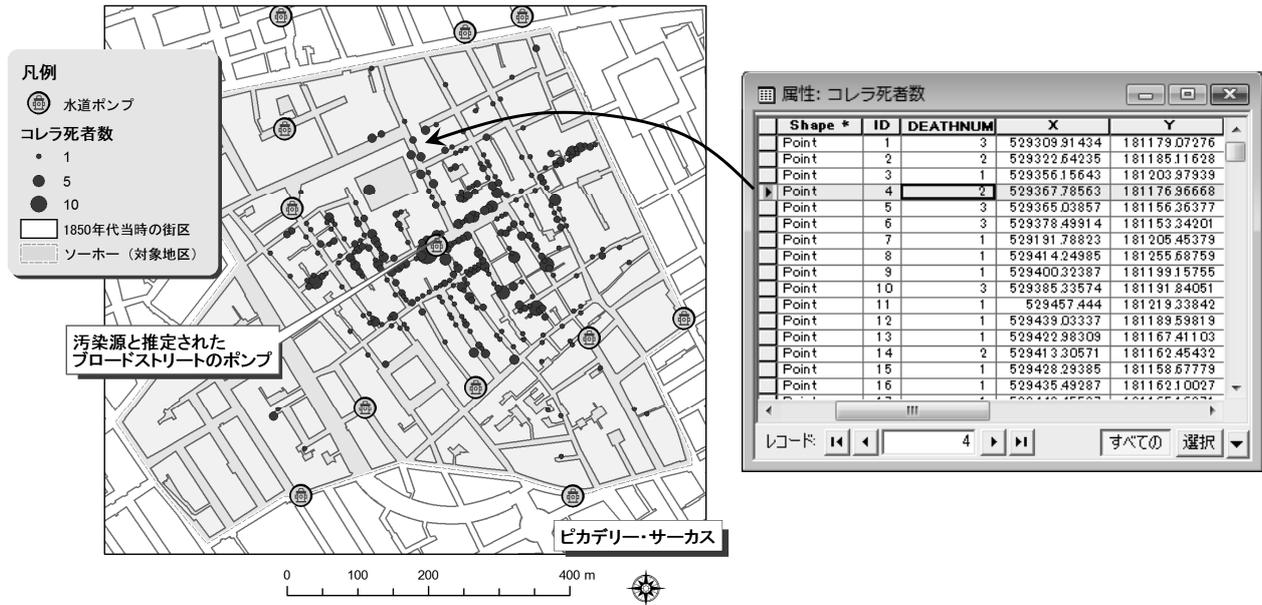


図2 Snowのコレラマップと地理情報

地図上に示される空間情報と表形式の属性情報が対応しており、属性情報の内容にあわせた地図上のシンボル表現が可能となる。

## 2.2 空間参照の自動化

現在のGIS環境を特徴付ける2つ目の機能は、地理座標をめぐる情報処理の自動化にある。異なる地理情報を地理的に重ね合わせ、レイヤケーキを作るのは、それほど簡単ではない。地表面上の位置を指定する場合、経度と緯度がよく用いられる。しかし、経緯度は極座標であり、極方向に向かうほど経度1度の地表面上での距離が短くなる。すなわち、本来3次元空間の中の曲面である地表面を、地図という2次元の平面（2次元直行座標空間）に写し撮る座標の変換、すなわち地図投影に注意が必要である。地図投影は、必然的に面積や距離、形状など空間的な特性をゆがめてしまうため、目的に応じて多数の地図投影法が提案されてきた<sup>20)</sup>。そのため、異なる地図投影法で描かれた地図を重ねたい場合、地図投影法の違いを補正する変換作業が必要である。

地図投影法に加え、地球の形状や座標基準点の定義である測地系が異なると、同じ経緯度でも地表面上の違う位置を参照してしまう<sup>20)</sup>。日本では2001年に測量法が改正され（施行は2002年）、測地系の基準が日本測地系から世界測地系へと変更された。その結果、それ以前の地形図の座標や日本測地系時代に作成されたGISデータは、現行の地形図の座標とは400～450mほどずれてしまう。こうした幾何的な変換に必要な計算作業は膨大である。

現在のGIS環境は、地図投影や測地系の違いを補正する幾何的な補正機能を有しており、多様な地理情報を効率よく重ね合わせる。そのため、それぞれで異なる座標定義を持った各種のGISデータやGPSデータ、リモートセンシング画像などを入手しても、効率的に情報を統合して管理できる。

幾何補正の技術は、地図投影や測地系の定義が分からない地図の画像や空中写真などの画像があった場合でも有効である。例えば、座標定義のない地図上に、正確に投影された地図上にある事物と対応づけることのできる地点が何箇所かあれば、これにあわせて座標定義のない地図を幾何補正し地理座標をもたせることができる。さらに、地理的座標づけがなされた画像をみながら「地図をなぞる」ことで、新たな地理情報を作成することもできる（ヘッドアップ・デジタル化）。

また、地理情報の中には地理座標を間接的に参照する情報もある。Snowは、死亡票に記載された住所を頼りにコレラマップを作成したが、住所は数値としての地理座標を持たない。しかし住所は地理座標とほぼ1対1の対応づけが可能であり、その対応関係の地理的辞書があれば、住所の文字情報から地理座標を取得する情報処理が可能となる。これをアドレス・マッチング（住所照合）と呼ぶ。日本では、国土地理院が街区レベルまでのアドレス・マッチングに必要な情報を公開しており、CSIS（東京大学空間情報科学研究センター）では、日本語テキストによって記述された住所リストから街区の座標リストを得るシステムを無償で公開している<sup>21)</sup>。

これら多様な方法により参照される地理情報を、GISは統一された地理座標空間の中に整理し、関連づける環境をもたらした（図3）。

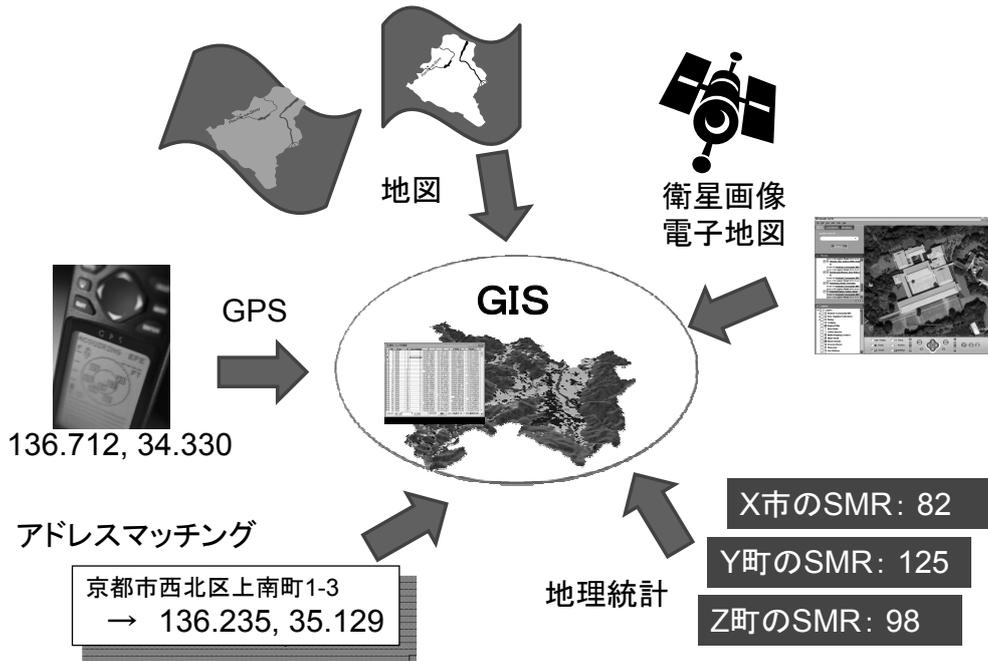


図3 GISによる地理情報の統合  
GISは数多くの地理情報を、同じ地理座標空間に位置づけ運用することを可能とする情報基盤

2.3 空間演算

GISが単なるコンピュータ・マッピング環境と異なる主たる点は、既存の地理情報から新たな地理情報を2次的に生成する空間演算の機能にある。その原型は、地図の重ね合わせ（オーバーレイ）法にある<sup>22)</sup>。この方法では、地域開発にあたっての適性を主題別に評価した条件地図を何枚か作成した上で、これらの条件地図を重ね合わせ、総合的な開発の適性を求める。このような地図の重ね合わせによって新たな情報を生み出す操作は、典型的な空間演算の1つである。現在では地理情報を変換・結合し新たな情報を生成する、数多くの空間演算の機能がGISに実装されている<sup>20)</sup>。

ここでは空間演算の一例として、Snow自身も試みたポロノイ図による分析をみておこう。ポロノイ図とは、1群の点分布が与えられた際、「どの点が最も近いのか」という基準に基づいて地理空間を領域分割した図である。もし一番近い水道ポンプを利用する行動原理があてはまるなら、この領域分割は各水道ポンプの利用圏を作る出す作業に対応する<sup>5,17)</sup>。

ただし、道路上を移動する方が、建物を横切る移動より容易である。そのため、より現実的には道路ネットワーク上の距離、あるいは建物と道路それぞれについての単位距離あたりの移動の容易さ（費用）を考慮した最小費用距離を考えるべきであろう。図4には、直線距離および最小費用距離を用いたポロノイ図をそれぞれ示してある。直線距離よりも道路上の移動を優先した最小費用距離の方が、ブロードストリートの水道ポンプの利用圏に患者がより多

く含まれていることは興味深い。

この図の作成は次のような空間演算を利用して作成されている。(1) 移動の容易さを示すレイヤを作成し（道路と建物の単位あたり移動費用を仮に1:100とした）、これに基づいて(2) 水道ポンプレイヤを基準にポロノイ図を作成する（空間的領域分割の演算）、(3) このポロノイ図でSoho地区内の領域にある部分のみを抽出（複数の地図レイヤの共通領域を抽出するオーバーレイ演算）した後、(4) 患者データを各水道ポンプの領域内で集計する（位置に基づいたデータ集計演算）、点データをこれが含まれるポリゴン（多角形領域）ごとに集計する(4)の作業（ポイント・イン・ポリゴン処理）は、地理的位置に基づいたデータリンクと、これを利用した地理的データベース集計の典型例である。すなわち、通常のデータベース処理では、複数のデータベースがあっても、「名前」や「ID」のような共通する項目を持つデータ間でしかリンクできないが、GISではそれぞれのデータベースの地理的位置関係に基づいてデータ間のリンクが可能なのである。

単純に2次元的な分布の中心や散らばりを要約する空間的な記述統計量も、GIS環境でよく利用される分析的な空間演算である<sup>23)</sup>。図5には、コレラ患者の平均中心（患者分布のx座標平均値とy座標平均値で定義される地点）と標準偏差円（平均中心からの距離について標準偏差を求め、これを半径とした円）を示してある。分布中心とブロードストリートポンプの位置はわずか30mほどのずれである<sup>17)</sup>。また、図中の等値線は、患者の密度分布面を表

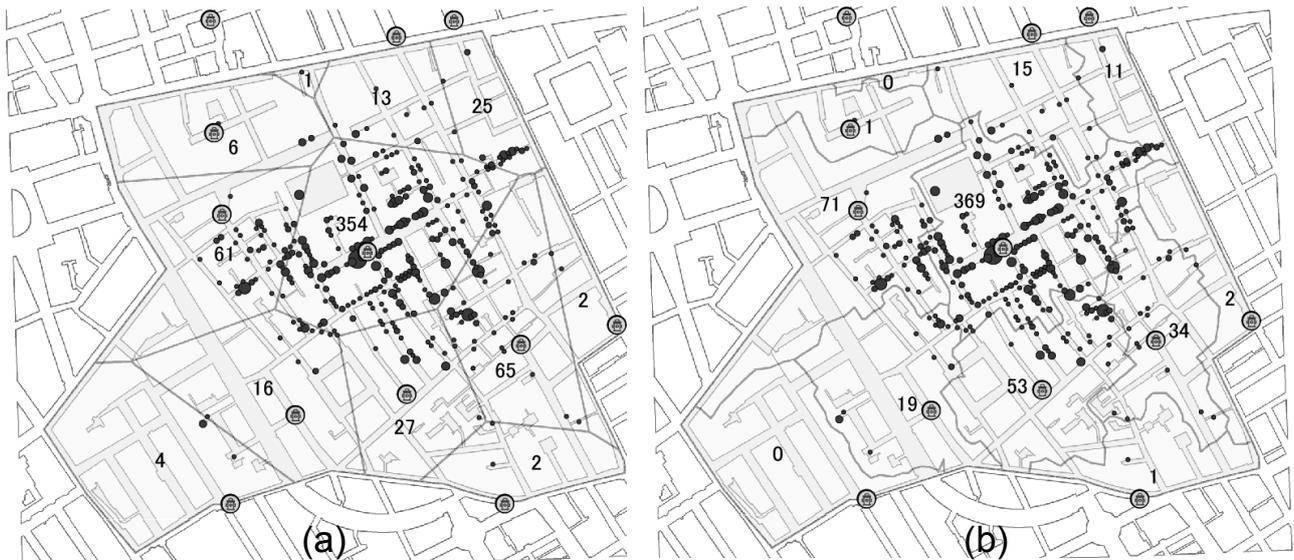


図4 Snowのコレラマップによるポロノイ図

(a) 直線距離によるポロノイ

(b) 移動費用最小化距離によるポロノイ (道路上の移動が容易となる設定がされている)

図中の数字は、各ポロノイ領域 (水道の利用圏と推定) に含まれるコレラ患者数

している。これは互いに重複する適当な半径の円領域ごとに点データを集計し点分布密度を求める作業を繰り返すことで、点分布密度の連続面を求めるカーネル密度法によって得られる。点分布よりも空間的な分布傾向がより明瞭であり、患者密度の最高点 (空間的な最頻値) とブロードストリートの水道ポンプの位置もほぼ一致することが分かる<sup>5)</sup>。

こうした地理情報の内部に潜む特性をデータの視覚化やデータの地理的なリンクを交えて試行錯誤的に引き出す探索的空間データ解析 (Explanatory Spatial Data Analysis: ESDA) は、GIS環境がもたらした新しいデータ解析環境である。さらには密度分布や分布統計量から、「患者密度が高い領域」、「患者分布の中心付近」を適当な基準で定め、この地理的領域に含まれる水道ポンプを自動的にリストアップするような疫学的解析と流行対策を結びつける自動処理も可能である。

## 2.4 空間疫学におけるGISの有用性

より一般に、空間疫学の分析には、死亡や疾病などのアウトカム・イベントとリスク人口 (population at risk) の地理情報、もしくはケース群とコントロール群の地理情報が必要であり、これらを用いて健康水準や疾病の地理的な分布が解析される。さらに健康リスクを規定すると考えられるリスク因子があれば、これを反映する地理情報が集められ、分析に利用される<sup>24)</sup>。

これらの地理情報は入手可能であっても、その情報の形態や地理的位置の定義が異なっている場合、既にみたように、これを統合するためにはGIS環境が不可欠である。また、直接入手・観測し得ない情報が地理的にモデル化さ

れる場合もある。Snowのコレラマップでは、水道ポンプへの近接性が、汚染された水への曝露機会の程度を示すモデル的な表現となっており、このモデルは空間演算を通して水道ポンプの地理情報から派生的に生成された点に注意されたい。このように、健康リスクを既定する地理情報を、GIS環境において効果的に推計し評価できる場合もある。さらには、GISは電子的な情報の入出力を通して、他の分析環境とリンクしたより高度な解析や、internetを通じた情報配信が可能となる。

とくに空間疫学におけるデータ解析では、GIS環境と他の分析環境・分析ツールとをつなぐ必要が生じる。これには、次のような4つの方式<sup>25)</sup>が考えられる (表1)。第1に、汎用GISの分析機能として分析ツールを組込む方法である。組込み機能であるため詳細な設定や機能の変更はできないが、GISのデータベースや高度な地理的視覚化、他の空間演算と連携した定型化された処理の繰り返しの優れる。代表的な汎用的GISソフトウェアの1つであるArcGIS (ESRI社)には地理的な集積性を検出する空間統計学のツールも1部実装されている。逆に、カーネル密度変換や空間データ補間、分布統計量の空間統計学的手法は、標準的なGISの機能として実装されたことに伴い、空間疫学での利用も促進された。

第2の方法は、汎用的な分析ツールにGISの機能を組込む方法であり、地理情報処理の機能は限定されるが、専門的で高度な分析技術を使いこなすことが可能となる。例えば、空間疫学の分析ツールも多く含む汎用の統計解析環境RではGISファイルの表示や簡単な処理が可能である<sup>26)</sup>。また、特定の空間分析に特化し、地図表示や解析に必要な空間データの作成・変換も可能なソフトウェア・

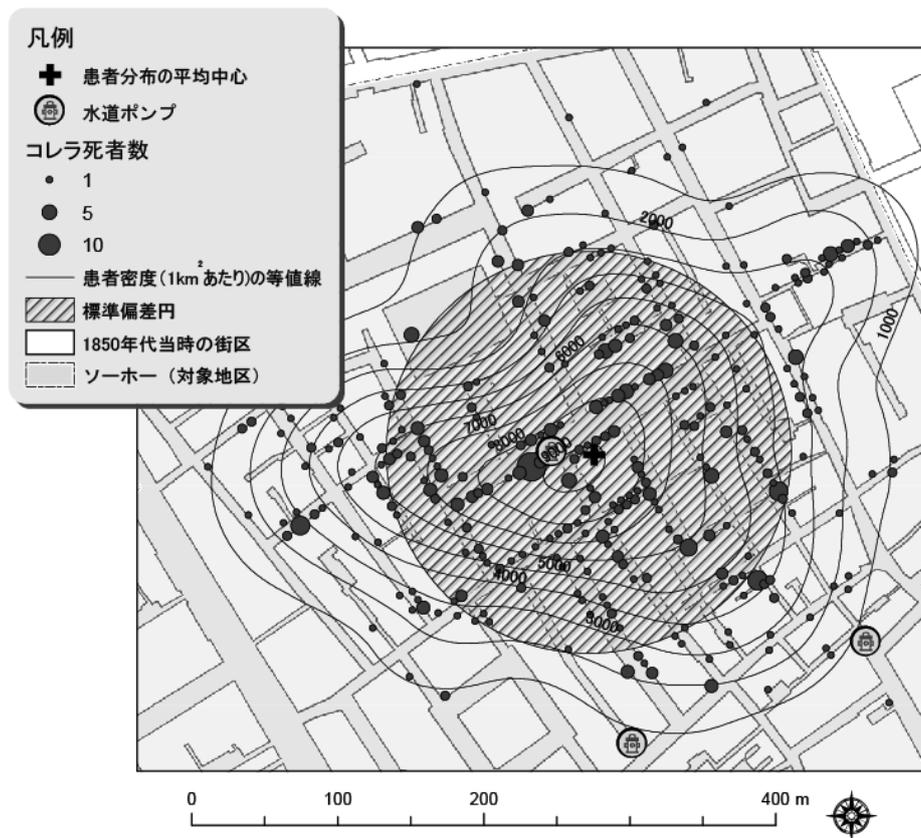


図5 コレラ患者分布の記述統計  
コレラ患者分布の中心と、ブロードストリートの水道ポンプの位置はほぼ一致する。

表1 GISと分析環境・ツールのリンケージ様式

方法	説明	例	利点	欠点
組込型 (GIS環境への分析機能組込)	分析機能のメニューを含むGIS環境の作成	GIS環境でのポロノイ図作成, カーネル密度, クリギング	GISの高度な可視化機能・GISデータベースの利用	拡張性に乏しい
組込型 (分析環境へのGIS機能組込)	地図表示, 距離計測などをのメニューを含む分析環境の作成	R, GeoDa, Winbugs など, 地図表示の可能な分析環境	専門的な分析機能の高度利用	地理的可視化, GISデータベースの利用
緩い結合型	GISと分析ツールを別個に運用	SaTScan, Crimestat, Flexscanの分析結果をGISで利用	計算速度, 開発コストの少なさ, 利用上の自由度の高さ	データ交換の手間, データ交換時のエラー
固い結合型	GISから分析ツールを動的に呼び出すインタフェースの作成	GIS側からのSaTScanやRの動的な呼び出し	GISと高度な分析環境とのシームレスな結合	開発コスト, 複数のソフトウェアにわたるバージョン管理

パッケージも開発されてきた。探索的な空間データ解析環境である GeoDa<sup>27)</sup> や、ベイズ階層モデルの環境である Winbugs<sup>28)</sup> などが代表的である。

第3の方法は、緩い結合 (loose coupling) 型であり、GISと外部の分析ツールを別個に操作する方法である。ユーザが独自にファイル交換を行うため、データ交換の手間とデータ交換の際に生じる人為的なデータエラーの危険性に注意せねばならないが、現実的には最も自由度が高く、一般的な利用形態である。疾病の空間的集積 (空間ク

ラスタ) の検出を行う分析ツールである SaTScan<sup>27)</sup> や Flexscan<sup>3)</sup>、高度な分布統計解析が可能な crimestat<sup>27)</sup>、などの空間疫学解析に有用な分析ツールでは地図描画の機能をもたないか、限定的な地図表現のみが可能なソフトウェアとして提供されており、結果の効果的な地理的視覚化にはGIS環境にデータを移行する。

最後の第4の方法は、固い結合 (tight coupling) 型であり、マクロ言語やOLEを利用し、GIS環境で外部ソフトウェア・パッケージを呼び出して利用する。たとえば、

SaTScan を ArcGIS 内から呼び出すスクリプトが、NCI (米国国立がん研究所) から公開されている<sup>29)</sup>。この方法はユーザ側からは第1の方法と変わらない使いやすさがある一方で、GIS と分析ツールのそれぞれのバージョン管理の手間がかかる。

これら GIS と空間分析ツールの連携方法には、運用にあたっての自由度と利用の容易さ、開発コストの点で長所・短所がある。しかし、たとえ緩い結合型を利用しなければならないとしても、多くの分析ツールは、GIS の標準的なファイルフォーマットや、GIS で利用可能なフォーマットへの整形が容易な単純な形式のデータファイルが利用されており、GIS と連携した高度な空間分析の運用も容易なものとなってきた。

さて、Snow のコレラマップ研究そのものは、GIS の標準的な地理情報処理の機能を用いて再現・再評価が可能であり、空間疫学における GIS の基礎的な解説に適しているが、リスク人口を考慮していない空間分析であることや、1 街区のような狭い地理的範囲での事例であり、これと同様な空間疫学的分析を適用できる状況は限られている。しかし、GIS が、空間疫学分析に必要な地理情報の管理・視覚化・解析を行う基盤的な環境として有用であることは明らかであろう。どのような地理情報と地理情報処理の組み合わせが必要か、有用な空間分析の方法は何か、どのような分析環境との連携が必要かは、個別の研究目的に応じて考えていく必要がある。

### 3 地理空間の中の健康を視る

#### 3.1 疾病の「適地」

GIS 環境に支援された空間疫学研究として、まずは GIS の基本的な地理情報の視覚化・統合・演算の機能を活用する研究事例をみてみたい。

広域的な空間スケール (小縮尺) での健康リスク評価には、人工衛星や空中写真によるリモートセンシング技術が早くから注目されていた<sup>30)</sup>。リモートセンシングは、地表面から反射・輻射される電磁波の特性に基づいて、地表面付近の物理的特性を評価する観測技術である<sup>20)</sup>。例えば、波長帯域ごとに反射・輻射される電磁波の強さによって与えられるスペクトル反射特性は、植生や土地利用、土壌の特性によって特徴的に異なるため、リモートセンシング画像を用いて土地被覆 landcover の分類や土地の状態を評価する指標値が得られる。人の肉眼で見える景色も可視光という波長帯域の電磁波による観測であり、空中写真もまた「離れたものを感じ取る」の意であるリモートセンシングの原理に従った手法である。

このリモートセンシングによる観測は、植生、気温、湿度など生物の生息環境の広域的なモニタリングに有用であり、媒介生物を伴って感染のサイクルが形成される感染症の場合、媒介生物の生息に適した環境の把握を通して感染リスクが推定できる<sup>8, 31)</sup>。マラリアは、「悪い空気」を意味する名称からも分かるようにヒポクラテスの時代か

ら、健康を損なう景観と結び付けられて理解されてきた。このような健康と結びつけた景観の抽出に、リモートセンシングによる環境モニタリングの観測技術を用いるのである。

図6は、Nihei et al. の研究成果<sup>32)</sup>に基づいてインドシナ半島におけるリモートセンシング・データを利用した熱帯熱マラリアのリスク評価事例を示したものである<sup>33)</sup>。正規化植生指標 (NDVI) は、リモートセンシング・データから計算される植生の活性度の指標である。この指標値が大きく植生の活動度が高い時期は、媒介蚊の活動に適した環境が続く期間とおおよそ対応し、この期間が長いほど蚊を媒介とする感染サイクルが長く持続するため、人間への感染リスクが増大すると考えられる。NDVI が0.4以上となる期間が半年以上続く土地と、熱帯熱マラリアの罹患率が1000人に1人以上となる流行地とがよく対応している。

ここでは (1) 行政単位別のマラリア罹患率の報告地と、月別の NDVI 平均値データが利用可能であったためこれを入手して GIS のレイヤとし、(2) 各月の NDVI 平均値のレイヤを重ねて、0.4以上である月数を算出、(3) これを地区別のマラリア罹患率と重ねて対応関係を評価している。同様な NDVI 値によるマラリア・リスク推定の有効性は、アフリカ中央部におけるより詳細な空間スケールでも確かめられている<sup>31)</sup>。

厳密には、ベクターの生息地と人間の感染リスクをつなぐ多くの地理的条件が介在する。すなわち、ベクターの生息域、病原体を保有するベクターの分布域、病原体を保有するベクターから人への感染リスクは、それぞれ異なった地理的分布をなす。それぞれの間の関係は、また別の観測技術やモデルを通して結ばれ、人の疾病の「適地」となる地理的な条件の特定とその将来変化の推計が可能となる<sup>34)</sup>。

#### 3.2 都市のデザインと健康

より詳細な空間スケール (大縮尺) においては、街の建造環境すなわち町並みのデザインに健康が規定されると考える視点が近年注目を集めている<sup>35-36)</sup>。そこでは、日常的に暮らす生活空間の "walkability" (歩いて暮らしやすい環境) が、生活習慣病のリスクを増大させる肥満と関連づけられて議論され、これに関連する町並みの形態的特性が GIS によって計量化されている。

簡単に言えば、日常的な生活に必要な活動を、歩いて移動できる範囲内でこなせない環境であるほど、車に頼った生活が中心になり、そこに暮らす人々の日常的な運動量は減少し、肥満となるリスクが増加するという。そのような walkability の計測値として、徒歩圏内の空間における土地利用の混在度・道路の接続性・居住密度・購買や就業の機会数といった指標群が提案されている<sup>37)</sup>。土地利用の混在度を例とすると、歩いて移動できる生活空間の範囲に、生活上必要な活動機会の種類が数多く存在しているほど、歩いて生活しやすい環境とみなされる。

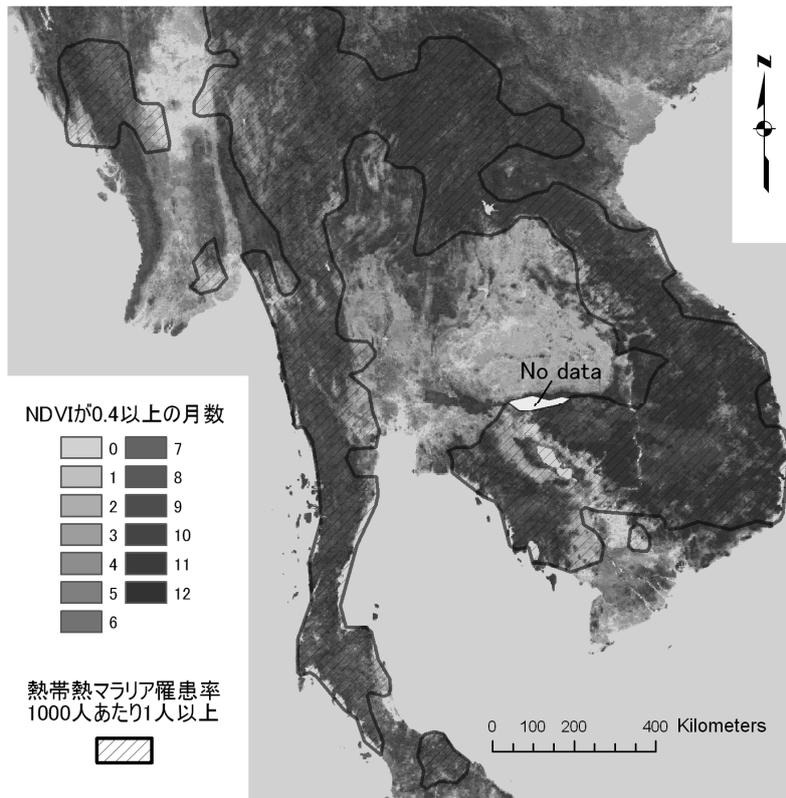


図6 インドシナ半島のマラリアリスク  
 正規化植生指標 (NDVI) の合成指標は、国立環境研究所「1997年東アジア植生指数月別モザイク図」と Nihei et al.<sup>32)</sup> の資料・方法に基づいて作成。マラリア罹患率は同論文に示された1998年の統計 出典：中谷 (2007)<sup>33)</sup>

Frank et al.<sup>38)</sup> は、まず (1) 土地利用と詳細な道路ネットワークデータを入手して GIS レイヤとし、また BMI 指標や所得、人種などの属性情報を伴う調査対象者の住所を (おそらくはアドレスマッチングを通して) GIS のポイント・データとした。そして、(2) 調査対象となった世帯の住所ポイントを基点に、道路ネットワーク上で1km 以内の空間的範囲 (バッファー) を生成し、(3) その内部の土地利用の混在度 (エントロピー指標) や道路形態指標を算出した。その上で、(4) 調査対象者のデータに空間的な計測指標を結合してデータを出力し、BMI 指標が30以上か否かの2 値変数を被説明変数とするロジスティック回帰分析を実施した。結果として、1 km という徒歩圏内にある土地利用混在度が高いほど、BMI が低くなる有意な関係がみられ、日常的生活空間内の土地利用が多様な環境であるほど、肥満のリスクが減少するとの仮説が支持されている。

図7は、1 km の徒歩圏内の範囲を、道路経路に沿ったネットワーク距離によって示してある。土地利用の混在度などの指標は、この範囲に含まれる土地利用などの情報を集計して指標値を計算する。図7には直線距離で半径1 km の円も示してあるが、Snow のコレラマップ同様に、大縮尺な地理空間では、距離の計測方法によって評価値が大きく変わってしまう可能性が理解できよう。

これら都市形態と健康をつなぐ知見が確かであれば、その成果は健康を維持する都市景観のデザインを通して健康なまちづくりに応用可能となる。健康に関連する行動は、単なる自発的な意思決定のみばかりか、個人のおかれる社会的な位置や地理的環境によって規定されていると考える社会疫学的な分析視角は、「近隣 neighbourhood」という生活空間の研究<sup>39-40)</sup> を通して、空間疫学研究と接合される。

### 3.3 空間統計学を利用した疾病地図

1990年代以降の最も普及した空間疫学分析は、市区町村や county, ward のような小地域 small area を単位とした疾病地図研究である<sup>4)</sup>。こうした地区単位での疾病地図研究そのものは、決して新しいものではないが、地理情報の普及と空間分析技術の発達で、小地域研究の実践的有用性に脚光を浴びせることとなった。とくに、標準的な GIS の空間演算や分布統計量よりも洗練された空間統計学の分析技術が、GIS の発展と並行して開発されてきた点は過小評価できない。統計データとしての小地域を単位とする地理情報には、通常の統計解析ツールでは対処しがたい特性が備わっているためである (表2)。これらの特性をふまえた空間統計学の技法を運用するために、空間分析ツールが数多く開発され、汎用の GIS 環境とあわせて、空間疫学の分析作業を支えている。

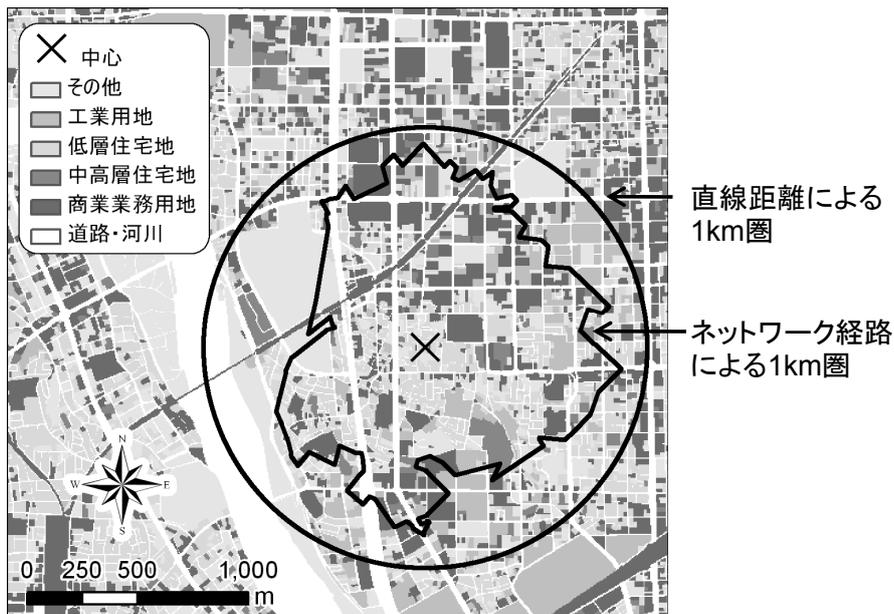


図7 徒歩空間と土地利用  
Frank et al. (2004)<sup>38)</sup>を参考に作成。道路のネットワーク経路に沿った1km圏内を徒歩圏とみなし、その内部に含まれる土地利用の構成から、walkability指標の1つ土地利用混在度の指標が計算される。

表2 疾病地図分析において問題となる空間データの統計学的問題

問題名	内容
少数問題 small number problem	小さな地理的単位を利用すると患者数のようなイベント発生数が少なくなり、罹患率のような率指標は統計的に不安定な値となる。率指標の不安定性(分散)は、地域人口に依存して変動するため、場所によって率指標の分散が異なる点を分析上考慮する必要がある。
空間的従属性 spatial dependency	空間統計は互いに独立なデータではなく、地理的に近接するほど互いに類似した値を示す傾向がある(正の空間的自己相関)。回帰分析では誤差に正の空間的自己相関がある場合、これを考慮しないと、回帰係数の有意確率(p値)が過小推定され、誤って有意と判定されやすくなる。
空間的異質性 spatial heterogeneity	地理的な現象が生み出されるプロセスは、制度、分化、歴史的背景などによって地理的に状況付けられて変わってしまう場合が多い。結果として、地理的な統計の水準やばらつき、変数間の相関関係が、地域によって異なることがよくある。
可変空間単位問題 modifiable areal unit problem	地理的に集計された統計値の場合、利用する地理的な単位によって、分析結果が変わってしまう。そのため、ある分析単位に基づいた結果を一般化したり、別の分析単位に基づく結果として推論することに危険性がつきまとう。

図8(a)は、1998-2002年の市区町村別標準化死亡比(すなわち、死亡数総数/年齢調整された期待死亡数×100)の分布図(男性)である<sup>33)</sup>。5年分の死亡数を集計した計算値であるが、農村的な性格をもつ市区町村を中心に、死亡数が少ない地域が多く、SMR値は大きく変動する。その結果、SMR値を階級区分した地図の色合いはパッチワークのようになり、分布傾向を読みとりにくい。このような少数問題は、単純化すれば、次のようなシグナル+ノイズ・モデルを通して理解できる。

$$\begin{aligned} \text{観測される健康水準の地域差} &= \\ & \text{真の健康水準の地域差} + \text{統計的な誤差} \\ & \text{(シグナル)} \qquad \qquad \qquad \text{(ノイズ)} \end{aligned}$$

すなわち、死亡数が少ないほど、ノイズである統計的な

誤差が大きくなり、本来知りたい対象であるシグナルを覆い隠してしまう。このノイズを除き、意味のあるシグナルとしての空間的なトレンドを取り出す方法に、空間的な従属性を考慮した空間的スムージングを利用できる。この方法では、各地区の死亡数および期待死亡数をその近傍にある地区のそれと比較し、これにあわせるよう補正する。ただし地区人口が多く期待死亡数が大きいほどSMRの補正は必要ではないため、これを考慮した統計学的な補正を行う手段として、ベイズ統計学を利用した空間的スムージングがよく利用されている<sup>3,5,9)</sup>。

図8(b)は、そうした技法の中でも最も簡易な技法である空間的経験ベイズ法<sup>5)</sup>をGeoda<sup>27)</sup>を利用して適用した結果であり、長野県付近の日本列島中央部に広がる低い死亡率と、東北地方北部から北海道南部にかけての高い死亡率という地理的なコントラストが明らかとなっている。

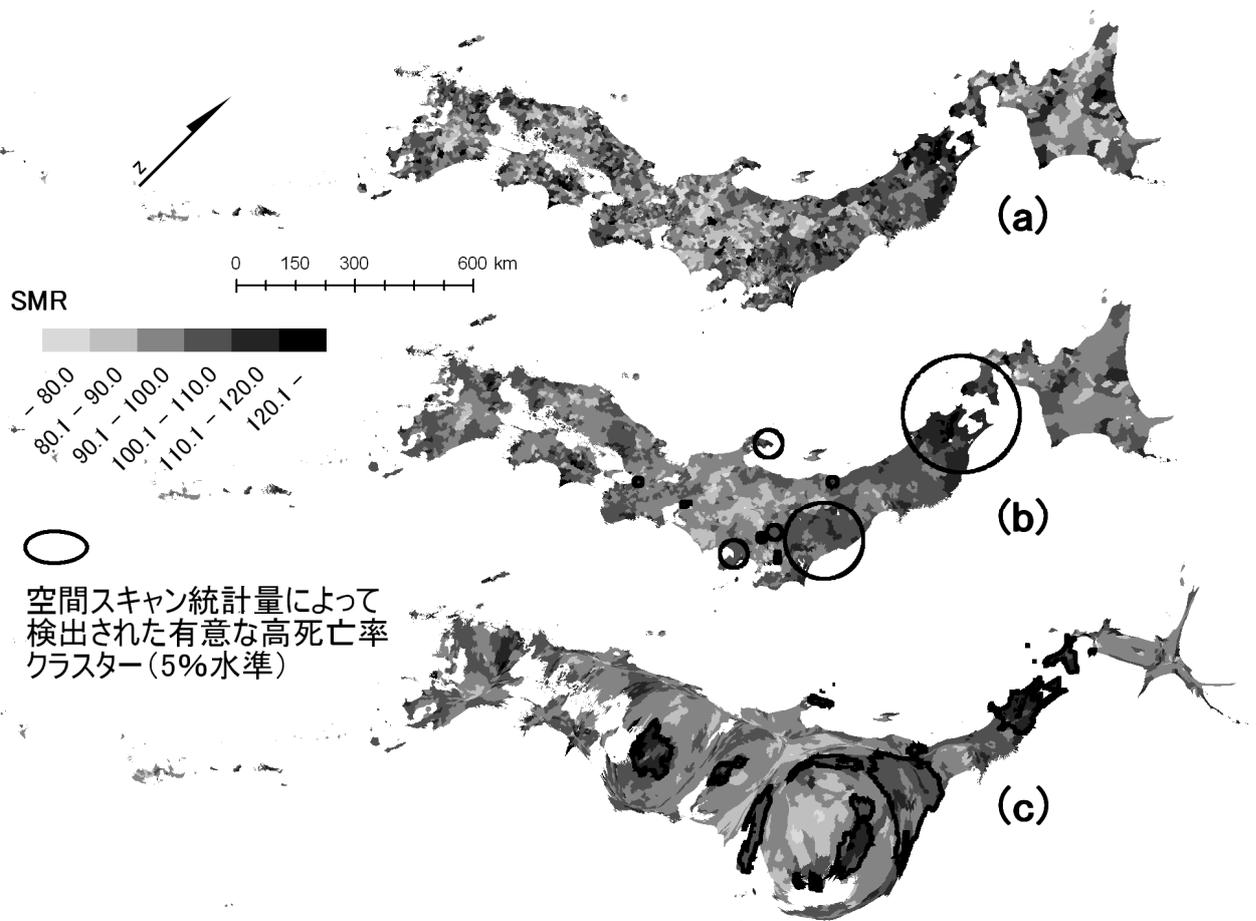


図8 疾病地図の空間分析

(a) 市区町村別男性標準化死亡率 (SMR), 1998-2002年,  
 (b) SMRの空間スムージングと空間スキャン統計量の結果 (円領域)  
 (c) 人口カルトグラムによるSMR分布 (空間スキャン統計量によって検出された高死亡率クラスターは、各クラスターに含まれる市区町村を囲む太線で示した) 出典：中谷 (2007)<sup>33)</sup>

しかし、こうした技法は全体的な分布傾向を明らかにするものの、高い死亡率の地理的な集積、すなわち空間クラスターを検出するには不向きな面もある。不健康な地域が集積する地理的な範囲はさまざまであり、どこでも同じ程度の空間的従属性を想定した空間的平滑化は、局所的なSMRの地理的変動を過度に平滑化してしまう危険性もある。

これは可変空間単位問題と呼ばれる地理情報のよく知られた問題と関連している<sup>41)</sup>。すなわち分析する地理的な単位の大きさ (空間スケール) や単位を定義する方法 (ゾーニング) によって分析結果が変わりうるという問題である。ただし、地理的な集積が新たな情報をもたらす場合もある<sup>42)</sup>。1つの地理単位で高い死亡率が観測された時、これ単独では統計学的に有意ではないが、その周囲に高死亡率の地区が連続して存在している場合、周囲の地区とあわせて検討すると、統計学的に有意な高死亡率の地理的集積を検出できるかもしれない。

そこで、不健康な地域がどこにどのような大きさで存在

しているのかが未知な場合、様々なサイズの空間検索領域 (典型的には円領域) を移動させながら、その内部の死亡率がそれ以外の地域の死亡率よりも有意に高いと確実に判定できる地理的範囲の検出を目的とした、空間クラスター検出の技法が提案されてきた<sup>3,5,9)</sup>。その代表的な技法である空間スキャン統計量<sup>43)</sup>による高死亡率の空間的集積範囲を、SaTScan<sup>27)</sup>を用いて求め、これを図8 (b) 中に円領域として示してある。

地理的な視覚化ばかりでなく、このような検出された空間クラスターの内部に含まれる市区町村の属性情報 (例えば、社会経済指標の統計値) を引き出し、その特徴をその周辺地域と比較するような探索的な検討作業にも、GIS環境では自然に移行できる<sup>44)</sup>。

### 3.4 健康格差を際立たせる地図学的変換

ただし、地理的な視覚化による分析では、統計学的な特性ばかりでなく、地理情報に基づいた空間表現の特性にも注意が必要である。地図の表現の仕方により、分布図から

読みとれる地理的パターンが大きく左右されることは、しばしば指摘されてきたが<sup>19)</sup>、地理的座標空間の定義そのものも、地理的な認識に大きく関係する<sup>18)</sup>。

GISは正確な地理的位置を測る測地学的な座標空間を扱うことが基本であるが、これは、社会的な格差としても重要な地理的な健康格差をみるには不向きな面もある。なぜなら、圧倒的に大多数の人口が集中する都市部の地理的単位は小さく、分布図においてその存在は視覚的に過小評価されがちだからである。

そこで、各地理的単位の大きさが人口に比例し、結果として地図上のすべての領域が等しい人口密度となるような地図学的変換—人口カルトグラムあるいは等人口密度図—が、空間疫学の方法として古くから利用されてきた<sup>17, 45)</sup>。この方法は、人口=社会的な地理的格差をより敏感に反映する地図でもある。図8(c)は、等角写像によって市区町村の形状をできるだけ維持しながら、その面積が地区人口に比例するように図8(b)の座標を変換した人口カルトグラム<sup>46)</sup>に、SMRの分布と空間スキャン統計量で結果を示したものである。

東京、大阪のような大都市は大きく拡大され、その内部に潜んでいた健康格差の大きさが明らかとなる。いずれの大都市圏にもインナーシティ部に集中する「不健康な中心」が存在し、この地に居住する人口を合計すると、通常の地図で目を引く東北地方北部から北海道南部にかけての高死亡率地区に住む人口よりも大きくなる。さらに、通常の地図では分らないが、健康水準の良好な地区に暮らす人口もまた、大都市圏の内部に集中しており、東京大都市圏には「健康な山の手」と「不健康な下町」の明確なコントラストが存在する。

このような大都市圏内部の健康水準の格差は、郊外化が終焉し、都心人口回帰と呼ばれる都心部での人口回復の時代を迎え、都心の健康水準が回復するのか、それとも都心部で増幅される社会格差が健康を損なうのか、また高齢化し差別化が進む郊外で健康水準の格差が広がるのか、今後の動向が注目される<sup>47)</sup>。

### 3.5 関連性の地図

健康水準の地域差を社会経済的指標や環境指標の地域差と関連づける地理的相関研究を、さらに精緻化する空間統計学的モデリングも、空間疫学の代表的な方法論である<sup>3-5, 9)</sup>。少数問題とともに、空間的従属性を考慮した地理的な回帰モデリングを精密に実行するために、疾病地図の作成にも用いられるベイズ統計学を用いた階層的なモデルが現在ではよく利用されている<sup>28)</sup>。誤差に空間的な自己相関を考慮するなどモデリングの柔軟性が高く、パラメータの推定のみならず、説明変数を考慮した疾病地図の作成をも可能とする点で便利だからである。

こうした死亡率の地域差を説明する回帰モデリングに際して注意すべきいま一つの点は空間的異質性である。死亡率の地域差を説明する地理的な指標は、地域によって大き

く異なるかもしれない。1例として、健康の格差と所得分布との地理的相関関係が国によって異なることが知られているが<sup>48)</sup>、そうであるならば1国内部の地方によって、さらには1都市圏内部の地域によって、健康の格差と所得分布との関係が変化しても不思議ではない。

この空間的異質性を考慮し、回帰係数の地理的な変動、すなわち変数間の局所的な関係の地図「関連性の地図」を描く発見的な空間分析技法として、GWR(地理的加重回帰法)<sup>49)</sup>がある。この方法は、各地点に適当な近傍領域を設定し、その近傍領域に含まれるデータセットのみを利用して回帰モデルをあてはめ、その結果をその地点「付近」の回帰係数として記録する。詳細は略すが、カーネル関数と呼ばれるベル型の重み関数を利用したファジイな近傍領域を設定することで、滑らかに連続する回帰係数の分布図が得られ、回帰係数の地理的な違いが「関連性の地図」として図示される。

少数問題にも対応するために改良されたGWRであるGWPR(地理的加重ポアソン回帰法)を用いて、幾つかの社会経済指標を説明変数に、就業年齢人口のSMRを分析した事例<sup>50)</sup>から、失業率の偏回帰係数にみられる地理的変動の地図を図9に示した(他に職業構成や持家割合、高齢化率が説明変数として利用されている)。

全体的として、東京湾沿岸を中心に失業率が高いほどSMRが高くなる有意な関係がみられる。しかし、失業率の低い農村的な地域を多く含む大都市圏北部地域では、相関関係は弱く、むしろ失業率の低い地域の方が不健康である。農村部では、家庭内での労働従事が実質的な失業を覆い隠していたり、より就業機会の多い地域へ健康的な人が移動してしまうことで、失業率の低さが必ずしも高い健康水準を導かないのかもしれない。他方で、失業がもたらす社会的な剥奪は、生活に必要な費用が高く、社会的なサポートを受けにくい都市部でより強く不健康と結びつきやすいと解釈できるように思われる。

### 3.6 時間と空間の疾病地図

疾病地図の空間分析における注意点は、時間の次元が捨象されている点にある。感染症の流行には、しばしば明確な時空間的推移のパターンがみられる。データのない地点の情報を空間的トレンドで推定するクリギング Kriging を利用して、地域別の流行のピーク時期の等値線を描くと、ヨーロッパでのインフルエンザの推移には、西部から東部あるいは地中海側から北部へと連続的に流行の波が移動する、近接的拡散 neighbourhood diffusion パターンがみてとれる<sup>51)</sup>。日本国内のインフルエンザ流行は、はるかに短期間に全国的に伝播するが<sup>52)</sup>、これには近接的拡散に加えて、都市の階層性に従って大規模な都市間で飛び火する階層的拡散 hierarchical diffusion も機能しているためと考えられる<sup>53)</sup>。

図10には、インフルエンザより緩やかな流行の拡大が進む HIV 感染症について、その流行推移を再び人口カル

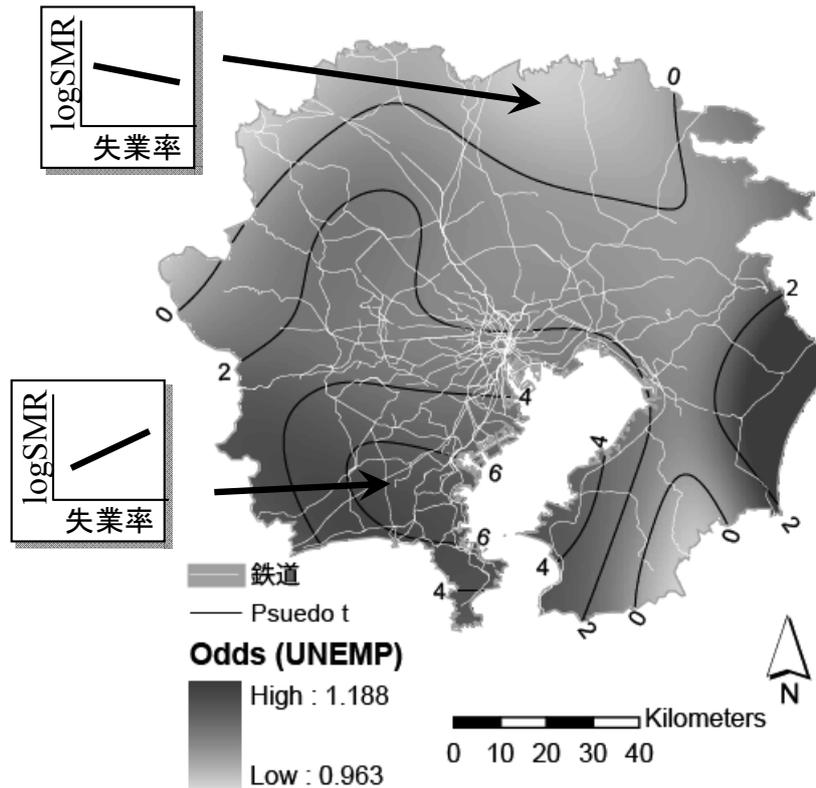


図9 地理的加重ポアソン回帰モデルによる「関連性の地図」

実線は疑似 t 値（失業率の偏回帰係数／標準誤差）  
 色の濃い地域では、失業率が高い地区ほど SMR が低くなるが、色の薄い地域では失業率の大小はほとんど SMR の変動を説明せず、疑似 t 値が 0 以下の地区では、失業率が低い地区ほど SMR が高くなる傾向を示す。出典：Nakaya et al. (2005)<sup>50)</sup>

トグラムを用いて示した。この図での各都道府県は人口規模に比例した白円で、HIV 感染者数の推定値は黒円で示されている。地域の人口規模が明示された疾病地図の推移をみると、HIV 感染症の流行において、階層的な拡散が明瞭である。初期には東京とその付近に集中していた流行は、大阪や福岡へと飛び火し、さらにその周囲へと流行が拡大する様子がみとれる<sup>54)</sup>。

空間統計学が可能とした新しいモデリングを応用して、時空間的な感染症流行の数理モデルと経験的な流行推移の整合性をはかり、HIV 感染症の流行を既定する地理的な「仕組み」を分析すると、こうした大都市での流行が、他地域の流行の持続的な拡大に寄与しており、大都市での流行対策の重要性が示唆される<sup>54)</sup>。

一方、環境に潜む特定のリスク要因に暴露され発病する場合には、「いつ」「どこで」「どの程度」リスク要因の影響の及ぶ空間に入っているのかが問題となる。交通機関の発達に伴って人間の活動する空間（アクティビティ・スペース）は拡大し、居住地を空間参照の基準として疾病をみるのが妥当でない場合もある。実際、発病地と居住地のずれから、喘息流行の要因が特定された古典的事例<sup>55)</sup>や、高校性のアレルギー性鼻炎有病率が居住地よりも通学先と関係しているという報告もある<sup>56)</sup>。スウェーデンの地

理学者 Hägerstrand によって提案された時間地理学<sup>57)</sup>の枠組みを用いると、個人が日常的に、あるいは生涯をかけて描く時空間的軌跡と、健康リスクに曝露される時空間的状況を整理できる<sup>58)</sup>。個人の精緻な移動と接触のモデルを通して行う大規模な感染症のシミュレーション<sup>59)</sup>も、時間地理学を応用した現代的な研究と位置づけることが可能である<sup>60)</sup>。

実際には個人単位で時空間的な軌跡を追うことは難しいが、時間地理学の解説のためにしばしば描かれる時間と空間のダイアグラムは、時空間的な流行を可視化する方法論としても示唆に富む。その一例を図11に示しておく。これは水平方向に2次元の地理座標空間を配置し、垂直方向に時間次元をおく時空間キューブであり、ひたくり犯罪という「社会的病」の流行を題材に、これが時空間的に集積する場所と期間を、垂直方向に伸びる円筒で表現している<sup>61)</sup>。これは、水平方向の円領域の中心位置と半径、垂直方向の位置・高さの設定を変更しながら総当たりに時空間的な集積の有無を探索する時空間的空間スキャン統計量<sup>62)</sup>の結果を、GISの3次元的な可視化機能を利用して示したものである。

ひたくり犯罪の流行は都市の中心部で恒常的に持続するが、周辺部では犯罪流行が時空間的に移動していること

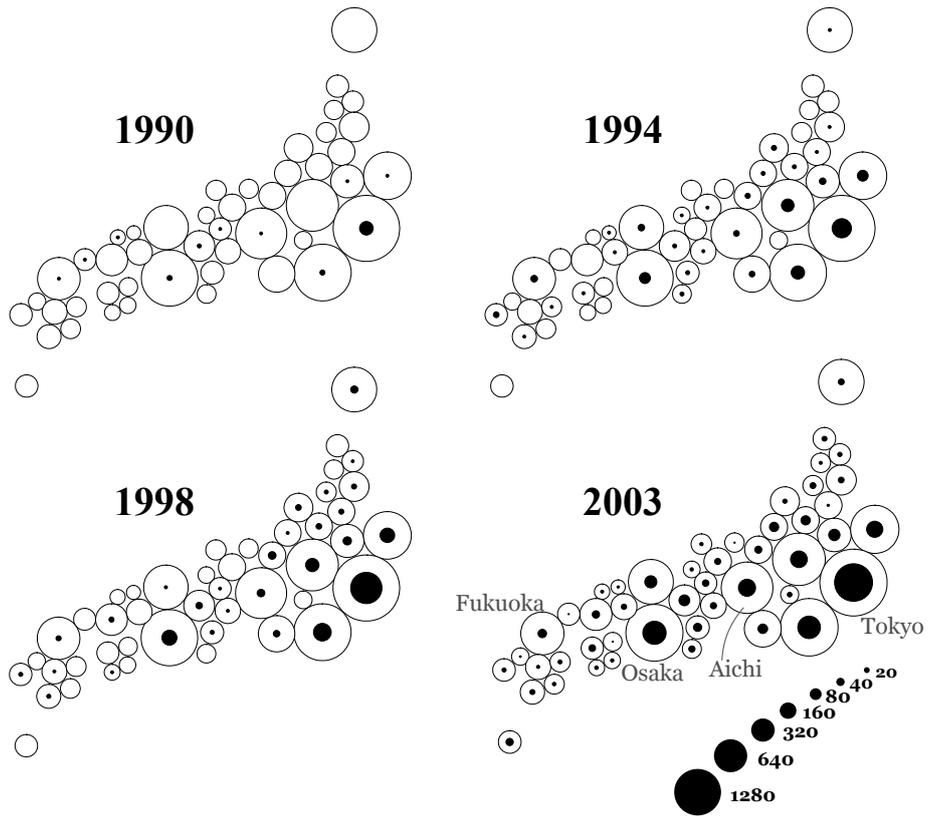


図10 新規 HIV 感染者数（日本国籍）推定値の地理的分布推移  
 報告地別情報から居住地別情報の推定，未報告率の推定による補正を試みた都道府県別の数値である。白丸は地域人口規模，黒丸は HIV 新規感染者に比例した大きさ示されている（白丸と黒丸の尺度は異なる） 出典：Nakaya et al. (2005)<sup>54)</sup>

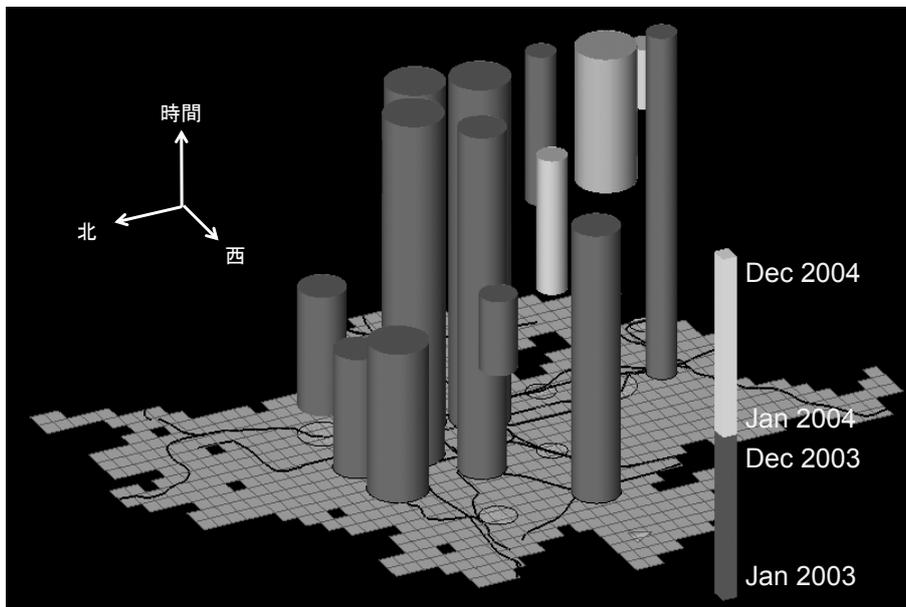


図11 「ひたくり流行」の時空間集積の時空間 3 次元地図  
 円筒はひたくりが有意に多発している地理的範囲と期間を示している。

が分かる。犯罪流行の空間的移動 displacement は、警察や住民組織による犯罪対策活動と関連していると考えられ、個別の流行地対策をつなぐ連携の必要性を示唆している。

こうした過去を振り返り流行の時空間的な特性を観測するばかりでなく、時空間集積の検出技法を用いた流行の早期警戒システム (Early Warning System: EWS) の構築も可能である<sup>63)</sup>。現在では、GPS での現地観測や市民からの通報を迅速に電子地図に記録していくことで、時空間の系列データをリアルタイムに更新するモニタリング・システムも、実用性のある段階に達しており、West Nile ウィルス流行の早期警戒に用いられている<sup>64-65)</sup>。

## 4. 結語：GIS 時代の空間疫学

### 4.1. 'Geographic'：地理的な知識と論理をつなぐ

GIS と空間疫学の分析技術の発達により、健康リスクの地理的な集積や格差を明らかにし、追及すべき健康問題を地図の上に浮かび上がらせるアプローチは、技術的にも容易なものとなり、また費用便益の観点においても効率化された。こうした健康への地理的な Geographic アプローチは、迅速で効果的な健康危機への対応といった実務的課題に応えるばかりでなく、「健康な地理空間とは何か？」という問いを改めて紐解く現代的な意義をも明らかにしつつある。

地理的なアプローチには二つの視点がある。1つは「地の記載 (Geo-Graphy)」であり、個々の場所にユニークなローカルな知識の体系的な整理を求める視点である。他方で、Snow のコレラマップをはじめとする空間分析は、「地の理 (ことわり)」を求める視点である。効果的な空間分析の実施には、この二つの視点の融合が必要である。すなわち、空間表現のための地図学、空間データ解析のための空間統計学のような汎用的な分析的方法論と、ローカルな知識との融合であり、Snow の水系感染説を社会的な意思決定にも影響するほど説得的なものとしたのは、ローカルな知識に長けたに協力者 Henry Whitehead によるところが大きいという Johnson の指摘は象徴的である<sup>66)</sup>。

空間クラスターの検出や GWR による関連性の地図にみられるように、空間的に局所的な特性を、性能の向上した計算資源を用いて効果的に明らかにするローカルな空間分析は、優れて現代的な空間分析の方法である。しかし、これによって生み出される分析結果の「地図」を解釈し運用するには、これまで以上に様々な地理的知識を要求しているようにも思える<sup>67)</sup>。GIS は、地図を通したコミュニケーションや多様な形態の地理情報の蓄積と連携を通して、ローカルな地理的知識・経験を共有し、分析研究につなげる支援環境としても、「地理空間の中の健康」を読み解く作業に貢献することが期待される。

### 4.2. 'Information'：GIS friendly な情報を

空間疫学研究の推進には、空間分析の発達のみならず、

空間疫学に必要な地理情報の整備が不可欠である。先進国では詳細な電子地図や人口統計など、地理情報の基盤整備が進んでいる。欧米では、疾病・健康水準に関する基礎的な地理情報として、人口動態統計から得られる死亡率やがん登録の地域統計が、時には GIS ファイルとともに公開されている。

日本でも厚生労働省のホームページからダウンロードできる地域別の健康情報も増加してきた。しかし、空間疫学研究に利用するためには、問題となる点も多い<sup>68)</sup>。たとえば、死亡率や SMR の統計表には、死亡率と SMR に加えて死亡実数が掲載されているが、期待死亡数や死亡率を定義する母数 (分母の値) は何故か含まれていない。そのため、経験ベイズやポアソン回帰モデルのような空間疫学で一般的な統計学的な分析に、すぐには利用できない。また、日本の死亡率の地域差は年齢階級によって大きく異なるが<sup>48)</sup>、広域にわたって市区町村を単位とする性年齢階級別死亡統計を電子的なファイルとして入手するには、人口動態統計の目的外申請に頼らなければならない。

現在の情報処理環境を考えれば、個人のプライバシー侵害の問題を生まない集計データについては、ユーザが独自に条件を設定し、人口動態統計の情報を引き出せるオンライン・システムなどが整備されると便利であろう。さらに保健統計の一部は保健所管轄圏あるいは 2 次医療圏単位で公開されるが、これら厚生行政に独特な空間単位の電子地図も、公的な機関で作成・更新されることが望まれる。

他方で、疾病地図による情報の公開と個人のプライバシー保護や地域のラベリングにつながらないような配慮も必要である。性感染症 (STD) の罹患率は米国大都市のインナーシティ部において突出して高く、そこで感染の連鎖を生む性的な関係のネットワークが狭い地理的な空間の中で築かれている。この知見は、STD 対策にとって優先的な地理的・社会的対象を指し示す<sup>69)</sup>。しかし、あまりにも詳細な地域差が明らかにされれば、たとえ居住者の大部分が STD の流行と無縁であっても、当該地域居住者への社会的な偏見を生むリスクをはらんでいる<sup>24)</sup>。

ただし、こうした危険性ばかりを強調することで本来対処すべき健康リスクに目をつぶるのも問題である。分析結果の公開にあたって、結果の読み方に十分な注意を喚起する、あるいは分析結果の提示方法に工夫を加え、厳密な場所の特定ができないようにするなど、結果の提示方法によって問題を回避できる場合もあるだろう<sup>24)</sup>。地理的な情報の利用・公開方法に関する検討も交えた、空間疫学に関連する地理情報整備の充実が望まれる。

### 4.3. 'Systems'：空間疫学を活かす

情報システムとしての GIS は、ハードウェア・ソフトウェアの性能向上、地理情報の充実、空間分析技術の発達によって完成度を高めてきた。一方で、これを空間疫学研究に効果的に活用するには、制度的なシステム設計も重要である。WHO (世界保健機関) や、米国の CDC (疾病

予防管理センター), NCI (国立癌研究所), 英国の SAHSU (小地域健康統計部) など, 国際機関や欧米諸国では空間疫学を推進する研究機関・部署が整備され, 必要な地理情報の整備・公開, 分析ツールの開発を統合的に進めている。また, 疫学や公衆衛生を担う人材の教育課程への GIS 教育も普及し, そのためのテキストも充実してきた<sup>24,70)</sup>。

GIS という技術は, データ処理環境や情報の共有を通して部門横断的な連携を促進するばかりでなく, 特定部門に限定されることなく多くの課題で活用できる地理的な分析方法・思考法を涵養する教育ツールとしても有用である。諸分野で議論されてきた GIS に関連する地理情報処理技術と分析方法論, さらにはその社会的意味を学際的に問う研究分野は, GIS の 'S' を 'System' から 'Science' へと変えた地理情報科学 (Geographic Information Science: GISci) の成立によって, 横断的に結び付けられるようになり<sup>1-2)</sup>, 空間疫学もこの動向と密接に関連している。新しい情報化社会の環境を活かした, 空間疫学による健康危機対応や「地理空間の中の健康」を追求する試みは, 関連する多くの研究・実務分野を通して取り組むことが効果的である。これを支えるフレームワークをもたらず点においても, 空間疫学における GIS/GISci の意義は大きい。

[付記] 本論の作成を支援して頂いた, 立命館大学 COE 推進機構研究員の村中亮夫博士, 立命館大学衣笠総合研究機構の花岡和聖博士に感謝申し上げます。

## 文献

- Longley P, Goodchild MF, Maguire D, Rhind DW, editors. Geographical information systems and science. Chichester (NY): Wiley; 2005.
- 矢野桂司. 地理情報システムの世界: GIS で何ができるか. 東京: ニュートンプレス; 1999.
- 丹後俊郎, 横山徹爾, 高橋邦彦: 空間疫学への招待. 東京: 朝倉書店; 2007.
- Elliott P, Wartenberg D. Spatial epidemiology: current approaches and future challenges. *Environmental Health Perspectives* 2004; 112: 998-1006.
- 中谷友樹, 谷村晋, 二瓶直子, 堀越洋一 編著. 保健医療のための GIS. 東京: 古今書院; 2004.
- Gatrell A, Löytönen M. GIS and health. London: Taylor & Francis; 1998.
- Lang L. GIS for health organizations. Redlands (CA) : ESRI Press; 2000.
- Ostfelda RS, Glassb GE, Keesinga F. Spatial epidemiology: an emerging (or re-emerging) discipline. *Trends in Ecology & Evolution* 2005; 20: 328-336.
- Lawson A, Biggeri A, Bohning D, Lesaffre E, Viel JF, Bertollini R, editors. Disease mapping and risk assessment for public health. Chichester (NY) : Wiley; 1999.
- ヒポクラテス, 著, 大槻マミ太郎, 訳. 空気, 水, 場所について. 大槻真一郎, 編・責任翻訳. ヒポクラテス全集 第1巻. 東京: エンタプライズ; 1987. p. 97-129.
- Snow J. On the mode of communication of cholera. 2nd ed. London : J. Churchill, 1855. Reprinted in snow on cholera. New York: The Commonwealth Fund; 1936.
- Koch T. Cartographies of disease: maps, mapping, and medicine. Redlands (CA) : ESRI Press; 2005.
- Robinson A. Early thematic mapping in the history of cartography. Chicago (IL) : University of Chicago Press; 1982.
- 長屋政勝, 金子治平, 上藤一郎. 統計と統計理論の社会的形成. 北海道: 北海道大学図書刊行会; 1999.
- 星旦二 編著. あなたのまちの健康づくり. 東京: 新企画出版社; 2001.
- Tufte ER. Visual explanations: images and quantities, evidence and narrative. Cheshire (CT) : Graphics Press; 1997.
- Cliff AD, Haggett P. Atlas of disease distributions: Analytic Approaches to Epidemiological Data. Oxford: Blackwell; 1988.
- Monmonier M. How to lie with maps. Chicago (IL) : University of Chicago Press; 1991. モンモニア, M. 著 渡辺潤 訳. 地図は嘘つきである. 東京: 晶文社; 1995.
- Brewer CA, Pickle L. Evaluation of methods for classifying epidemiological data on choropleth maps in series. *Annals of the Association of American Geographers* 2002; 92: 662-681.
- 地理情報システム学会, 編. 地理情報科学事典. 東京: 朝倉書店; 2004.
- 相良毅, 有川正俊. 日本の住所体系に適した分散アドレスマッチングサービス. 地理情報システム学会講演論文集 2000, 9, 183-186.
- McHarg I. Design with nature. Garden City (NY) : the Natural History Press; 1969.
- de Smith MJ, Goodchild MF, Longley PA. Geospatial Analysis: A comprehensive guide to principles, techniques and software tools. Leicester: Matador; 2007.
- Cromley EK, McLafferty SL. GIS and public health. New York: Guilford; 2002.
- Sui DZ. GIS-based urban modelling: practices, problems, and prospects. *International Journal of Geographical Information Science* 1998; 12: 651-671.
- 谷村晋. R による空間疫学分析. 岡田昌史, 編. The

- R Book: データ解析環境 R の活用事例集. 東京: 文唱堂; 2004. p.243-263.
- 27) 中谷友樹. 空間クラスター検出のための GIS ツール CrimeStat, GeoDa, SaTScan. 岡部篤行, 村山祐司, 編. GIS で空間分析. 東京: 古今書院; 2006. p. 183-220.
- 28) Lawson AB, Browne WJ, Vidal CL. Disease mapping with WinBUGS and MLwiN. Chichester (NY): Wiley; 2003.
- 29) ESRI. Evaluating data with GIS and spatial statistical analyses: national cancer institute uses GIS statistical tools to reveal patterns. Healthy GIS 2006 Summer. Available from <http://www.esri.com/health>
- 30) Cline BL. New eyes for epidemiologists: aerial photography and other remote sensing techniques. American Journal of Epidemiology 1970; 92: 85-89.
- 31) Hay SI, Randolph SE, Rogers DJ. Remote sensing and geographical information systems in epidemiology. San Diego (CA): Academic Press; 2000.
- 32) Nihei N, Hashida Y, Kobayashi M, Ishii A. Analysis of malaria endemic areas on the Indochina peninsula using remote sensing. Japanese Journal of Infectious Diseases 2002; 55: 160-166.
- 33) 中谷友樹. 地理空間から健康を理解する. Japan Geoscience Letters 2007; 3(3), 6-8.
- 34) Rogers DJ, Randolph SE. The global spread of malaria in a future, warmer world. Science 2000; 289: 1763-1766.
- 35) Powell KE, Martin LM, Chowdhury PP. Places to walk: Convenience and regular physical activity. American Journal of Public Health 2003; 93: 1519-1521.
- 36) Frank LD, Saelens BE, Powell KE, Chapman JE. Stepping towards causation. Do built environments or neighborhood and travel preferences explain physical activity, driving, and obesity? Social Science and Medicine 2007; 65: 1898-1914.
- 37) Leslie E, Coffee N, Frank L, Owen N, Bauman A, Hugo G. Walkability of local communities: using geographic information systems to objectively assess relevant environmental attributes. Health and Place 2007; 13: 111-122.
- 38) Frank LD, Andresen MA, Schmid TL. Obesity relationships with community design, physical activity, and time spent in cars. American Journal of Preventive Medicine 2004; 27: 87-96.
- 39) Leyden KM. Social capital and the built environment: the importance of walkable neighborhoods. American Journal of Public Health 2003; 93(9): 1546-1551.
- 40) Kawachi I, Berkman L. Neighborhoods and health. Oxford: Oxford University Press; 2003.
- 41) Openshaw S. The modifiable areal unit problem. CATMOG 38. Norwich: Geobooks; 1984.
- 42) Nakaya T. An information statistical approach to the modifiable areal unit problem in incidence rate maps. Environment and Planning A 2000; 32: 91-109.
- 43) Kulldorff M. A spatial scan statistic. Communications in Statistics – Theory and Methods 1997; 26: 1481-1496.
- 44) Fukuda Y, Umezaki M, Nakamura K, Takano T. Variations in societal characteristics of spatial disease clusters: examples of colon, lung and breast cancer in Japan. International Journal of Health Geographics 2005; 4: 16. (Online Journal: <http://www.ij-healthgeographics.com/content/4/1/16>)
- 45) Dorling D. Area Cartograms: Their use and creation. CATMOG 59. Norwich: Environmental Publications; 1996.
- 46) Gastner MT, Newman, MEJ. Diffusion-based method for producing density equalizing maps. Proceedings of the National Academy of Sciences 2004; 101: 7499-7504.
- 47) 中谷友樹. 地理空間の中の格差と健康: 東京大都市圏の所得と健康の地理的格差を通して. 保健医療社会学論集 2008; 18(12): 36-48.
- 48) Nakaya T, Dorling D. Geographical inequalities of mortality by income in two developed island countries: a cross-national comparison of Britain and Japan. Social Science and Medicine 2005; 60: 2865-2875.
- 49) Fotheringham S, Brunsdo C, Charlton M. Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships. Chichester (NY) : Wiley; 2002.
- 50) Nakaya T, Fotheringham S, Brunsdon C, Charlton M. Geographically weighted Poisson regression for disease associative mapping, Statistics in Medicine 2005; 24: 2695-717.
- 51) Saito R, Paget W, Hitaka S, Sakai T, Sasaki A, van der Velde K, Suzuki H. Geographic mapping method shows potential for mapping influenza activity in Europe. Euro Surveill 2005; 10(10).
- 52) Sakai T, Suzuki H, Sasaki A, Saito R, Tanabe N, Taniguchi K. Geographic and temporal trends in influenza-like illness, Japan, 1992-1999. Emerging Infectious Diseases 2004; 10(10): 1822-1826.
- 53) 中谷友樹. インフルエンザの時・空間的モデルー 1988～1989年におけるわが国の流行を事例としてー. 人文地理 1994; 46: 254-273.
- 54) Nakaya T, Nakase K, Osaka K. Spatio-temporal

- modelling of the HIV epidemic in Japan based on the national HIV/AIDS surveillance, *Journal of Geographical Systems* 2005; 7: 313-36.
- 55) Antó JM, Sunyer J. Soya bean as a risk factor for epidemic asthma. In Elliott P, Cuzick J, English D, Stern R. *Geographical and environmental epidemiology: Methods for small-area studies*. Oxford: Oxford University Press; 1996: p. 323-41.
- 56) 村中亮夫, 中谷友樹, 吉岡達生. 高校生の通学パターンにみるアレルギー性鼻炎有病率の地域差—山口県岩国地域における事例分析—. *地理学評論* 2007; 80-2: 87-98.
- 57) Hägerstrand T. What about people in regional science? *Papers of the Regional Science Association* 1970; 24: 7-21.
- 58) Schærström A. *Pathogenic paths?: A time geographical approach in medical geography*. Lund: Chartwell-Bratt; 1996.
- 59) Barrett CL, Eubank SG, Smith JP. If smallpox strikes Portland..., *Scientific American* 2005; 292(3): 42-9. バレット CL, ユーバンク SG, スミス JP. 感染症を抑え込め大規模予測モデルの実力. *日経サイエンス* 2006; 6月号: 66-75.
- 60) 中谷友樹, 花岡和聖. ジオシミュレーションと空間的マイクロシミュレーション. 村山祐司, 柴崎亮介編. *GISの理論*. 東京: 朝倉書店; 2008. p.142-160.
- 61) 中谷友樹, 矢野桂司. 犯罪発生の時空間3次元地図—ひたくり犯罪の時空間集積の可視化—. *地学雑誌* 2008; 117(2): 506-521.
- 62) Kulldorff M, Athas W, Feuer E, Miller B, Key C. Evaluating cluster alarms: A space-time scan statistic and brain cancer in Los Alamos. *American Journal of Public Health* 1998; 88: 1377-1380.
- 63) Lawson AB, Kleinman K. *Spatial and Syndromic Surveillance for public health*. Chichester (NY): Wiley; 2005.
- 64) Mostashari F, Kulldorff M, Hartman JJ, Miller JR, Kulasekera V. Dead bird clusters as an early warning system for West Nile virus activity. *Emerging Infectious Diseases* 2003; 9: 641-646.
- 65) Shuai J, Buck P, Sockett P, Pollari JAF. A GIS-driven integrated real-time surveillance pilot system for national West Nile virus dead bird surveillance in Canada. *International Journal of Health Geographics* 2006, 5: 17.
- 66) Johnson S. *The ghost map*. New York: Riverhead Books; 2006.
- 67) 中谷友樹. 空間的共変動分析. 杉浦芳夫, 編. *地理空間分析*. 東京: 朝倉書店; 2003. p.23-48.
- 68) 福田吉治. 公衆衛生分野における政府統計の利活用と個人情報保護. *学術の動向* 2007年12月; 30-35.
- 69) Becker KM, Glass GE, Brathwaite W, Zenilman JM. Geographic epidemiology of gonorrhoea in Baltimore, Maryland, using a geographic information system. *American Journal of Epidemiology* 1998; 147: 709-716.
- 70) Kurland KS, Gorr WL. *GIS tutorial for health*. Redlands (CA) : ESRI Press; 2006.