

地理情報システムによる感染症の伝播特性に関する研究 — S A R S 伝播抑制のメカニズム解析 —

南京大学 ○佐藤 充 日大生産工(院) 山田 悟史
日大生産工 大内 宏友

1. はじめに

都市空間における安全性は、物理的な安全性、環境付加要素に対する安全性、感染症・犯罪等の不可視的な突発要素に対する安全性に分類される。とくに、世界1日行動圏の実現や人的、物的移動の活発化に伴い感染症は21世紀における人類に対する最大の脅威となり、人口密度が高い都市空間においては急速な伝播による多数の発症者が短期間で発生する危険性を内包しているといえる。感染症と空間領域の関連性に関する研究は、19世紀に英国医師JohnSnowが用いたコレラ地図作成が最初のケースと言える。GIS（地理情報システム）の地域保健分野への活用は、WHO（世界保健機関）が世界各国の保健地理情報を統一的に管理するHealthMapperをUNICEF（国連児童基金）と共同で開発する等GISの普及による地域保健水準の向上を図っている。GISを利用した感染症の伝播解析については、HealthGIS^{*1}等において研究が発表され、患者発生状況の分布や相互連関の把握において活用されている。

これらをふまえて本研究は伝播メカニズムについて解析手法を確立し、感染症伝播抑制、防御の方法の実現を目的としている。以上より本論文では感染症のうち原因が未だ特定されず致死率が高く世界規模での伝播拡大が発生したSARSに関する伝播メカニズム解析⁴⁾を行う。さらに発症者数が多い大都市北京市の患者発生実態を把握し、安全な都市空間を構築するための伝播抑制や防御に関する考察することを目的とする。

2. 本論文の構成（図1参照）

本論文は世界規模で発生したSARSの伝播特性について解析し、その抑制・防御について考察するため三段階の属性において伝播解析を行う。最初の属性では世界全体の視点から解析を行い、SARSの伝播について把握する。次に把握した国別の感染者数を用いて解析を行い、伝播特性の類型化を行うと同時に各対応について考察する。そして、都市レベルの解析として北京市を対象に人口密度に着目し、伝播シュミレーションを行う。以上三段階の考察からSARSの伝播特性を把握し、その抑制と防御について考察する。

3. SARSの世界規模での伝播

3.1. SARS伝播の特徴

世界規模で発生したSARSの伝播について把握するためWHO公開データを用いて最も大きな属性である世

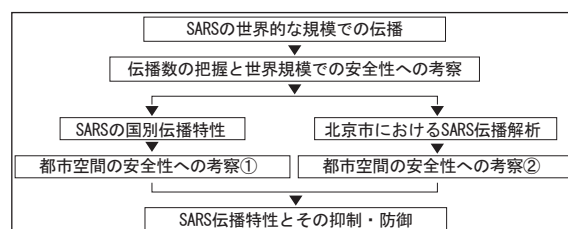


図1. 本論文の構成

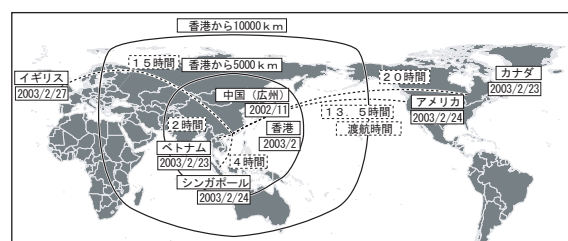


図2. SARSの初期伝播

表1. SARSの国別発症状況

国	2月1日	2月2日	2月3日	2月4日	2月5日	2月6日	2月7日	2月8日	2月9日	2月10日	2月11日	2月12日	2月13日	2月14日	2月15日	2月16日	2月17日	2月18日	2月19日	2月20日	2月21日	2月22日	2月23日	2月24日	2月25日	2月26日	2月27日	2月28日	合計
オーストラリア	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
ブラジル	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
カナダ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
中国	305	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	305
香港	0	3	8	125	232	357	468	360	231	85	44	21	9	1943															9258
台湾	0	0	1	2	8	6	11	10	57	94	211	333	12	745															1943
韓国	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
フィンランド	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
フランス	0	0	0	0	0	0	1	3	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
ドイツ	0	0	0	0	0	0	4	1	0	1	2	0	1	1	10														10
フィリピン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
ポーランド	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
アイルランド	0	0	0	0	0	0	2	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
韓国	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
ルーマニア	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
ロシア	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
シンガポール	0	0	0	3	19	59	57	35	51	18	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	247
南アフリカ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
スウェーデン	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
スイス	0	0	0	0	0	5	-4	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
タイ	0	0	0	0	0	0	4	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
英国	0	0	0	0	0	2	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
米国	0	0	0	0	0	11	48	95	66	16	16	4	1	3	260														260
ベトナム	0	0	1	41	35	1	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84
合計	305	3	16	192	363	1016	1161	786	2344	1736	724	547	65	9258															

注：上-1～10日 中-11～20日 下-21～31日

界全体における伝播の傾向を分析する。感染症の伝播解析において重要な要素となると考えられることから時間距離より分析する（図2、表1）。

2002～2003年に発生したSARS流行は中華人民共和国広州市周辺で2002年11月に発生した後沈静化し、2003年2月に香港を発症源として、中華人民共和国、ベトナム、シンガポール、アイルランド、米国、カナダへと世界的な伝播となった。香港から同日に伝播した最大距離はカナダトロントの約20,000Kmとなり、航空旅客による伝播と推定できる。航空路線整備により世界中が1日行動圏域となったことが感染症の発症後に世界的な規模で急速に伝播する原因となり、SARS伝播において、アジアを中心に人

の移動に伴い予想外の規模と速度で拡大し、発症源から遠隔地にある欧州、アフリカ、北米、南米においても発生したと推測できる。

3.2. SARSの国別伝播特性 (図3参照)

国別の伝播特性について解析し、各国の対応とあわせて伝播抑制、防御に関する考察を行う。

1) 中華人民共和国における伝播特性

SARSは2003年2月9日に広州市周辺で大量に発症し、その後患者発生が2ヶ月近く見られない状況となったが、経済発展が著しく人の往来が多い中国沿岸部や首都北京市で更に大量な患者が発生し、病院から感染が拡大する等の副次感染となり終息まで4ヶ月間を要している。

2) ベトナムにおける伝播特性

ベトナムのSARS発生は1.5ヶ月間で終息となったことは初期対応、患者隔離の重要性が証明されている。ただし、患者の発生ピーク後に未発生時期を経て再度小数の患者が地方部で発生したことは必要情報の全国規模での周知徹底に課題が残る結果となった。

3) 香港(都市国家)における伝播特性

香港のSARS累計患者数は1,943人となり対人口当たりの患者発生数が0.3%(人口総数約700万人)となり、中国の0.0005%や0%に近い欧米諸国に比較しても異常に高い発生率を示している。このことは流行発生源(感染源地域)となり流行初期のため原因、対策が特定できない状況での伝播が原因と考えられる。

ただし、ベトナムが2003年3月23日の週で終息方向となり患者隔離等の防御情報がWHOから各国へもたらされた状況を考慮すると、香港は2003年3月30日の週が患者発生のピークとなり終息まで更に9週間経過したことは、都市における感染症伝播抑制、防御が都市活動を阻害しても患者の完全隔離を実施することが重要なポイントとなることを示している。

3.3. 都市空間の安全性への考察

各国の新規発症数の経過を用いた分析から各国の伝播特性を類型化し、WHOの対応と安全性の考察を行う。

1) 新規発症のパターン分類 (表2)

SARS流行地域における新規発症の期間により3パターンに大別できる。

- ・2ヶ月終息型 (ベトナム、アメリカ、カナダ)
- ・3ヶ月終息型 (シンガポール)
- ・長期型 (香港、中国、台湾)

さらに、新規発症例の分布から最大値(ピーク)の位置により3つに分類することができ、期間と同様に適切な措置が実施されればピークは中心点より前に来るため伝播が抑制されることが考察できる。

- ・ピーク前半型 (ベトナム、アメリカ、シンガポール)
- ・ピーク中間型 (香港)
- ・ピーク後半型 (カナダ、中国、台湾)

2) WHOの渡航勧告解除に対する評価

WHOでは潜伏(7~10日間)→1次感染者発症→2次感染者発症の期間を基に20日間新規発症例が見られない場合には「渡航勧告地域」の指定を解除しているものと推測される。しかし、カナダ(ピーク後半型)

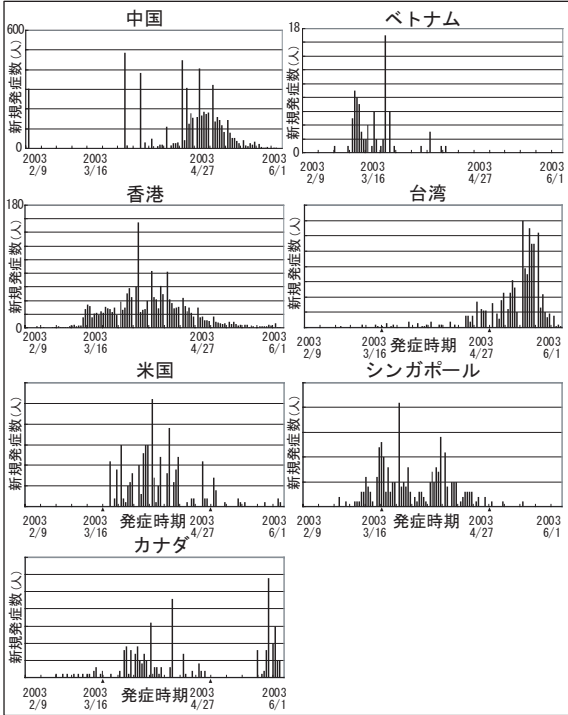


図3. 国別新規発症数

表2. 国別新規発症の分類

	2ヶ月終息型	3ヶ月終息型	長期型
ピーク前半型	ベトナム アメリカ	シンガポール	香港
ピーク中間型			
ピーク後半型	カナダ		中国 台湾

では第1症例群が終了した23日後に第2症例群が発生している。SARS対処を適切に実施したベトナムでは発症例〜終息まで約2ヶ月間かかったことは、20日間経過による渡航勧告解除の再考が望まれる。

3) 都市空間と感染症伝播抑制、防御

SARSの伝播は空気伝染となるため患者の隔離が重要となるが、日常的な活動(就業、就学等)制限や感染者の分離は困難である。また、香港の発症率0.3%を基に東京都の発症患者数を試算すれば約3万人となり患者を完全隔離する施設容量の課題が指摘される。

4. 北京市におけるSARS伝播解析

中国のSARS発症者総数5,629名のうち32.6%を占める北京市におけるSARSの伝播プロセスを解明することは、都市空間における感染症伝播抑制の方策検討に対する指針を示唆するものと判断する。

4.1. 感染症伝播メカニズム解析手法の概要(図4参照)

感染症伝播メカニズム解析は、「人から人」へ伝播する感染症の発症状況情報と地図情報及び区域単位毎の人口密度情報を含む地図関連情報に基づいた感染症伝播を解析する手法であり、発症状況情報中の所定発症期間内の発症者群から第1号及び第2号発症者を特定し、この両者の所在情報を基に感染伝播地(感染源地域)を特定する。発症状況情報に基づき、発症区域単位に係る人口密度に対する発症者密度の指標を求め

る発症者密度相関モデルと、感染場所の位置情報と発症時刻情報とで感染症の伝播速度を求め、発症区域単位に係る人口密度に対する伝播速度の指標を求め、この伝播速度相関モデルとを作成し、両モデルから、指定した区域単位の発症者数を算出して伝播シミュレーションを行う。

4. 2. 北京市におけるSARS伝播解析シミュレーションの手法

1) 基礎データの収集

中国政府衛生局の発表データ（4/27以降）や統計データを基に北京市各区及び県の発症状況データを作成する。データを表4に示す

2) 北京市におけるSARS伝播解析

(1) 人口密度データによる発症者密度度解析

発症後第1週のデータを基に各区、県の発症者密度と人口密度の第1週の相関を検証すると相関係数0.913と高い相関を示している。

(2) 発症状況データによる伝播速度解析

発症後第1週データから伝播速度を求める。発症者住所データ（位置情報）及び発症時間が非公開のため各区、県の面積、発症者数を基に以下の方法で伝播速度を設定する。

①A区の「面積」÷A区の「初日の発症者数」=A区の「初日の発症者1人あたりの専有面積」（面積/人）

②A区の「初日の発症者1人あたりの専有面積」の平方根=A区の「初日の発症者と発症者との距離」を接近度として設定する。

③同様に1週間後の累計発症者数を対象に、A区の「1週間後の発症者と発症者との距離」（接近度）を算出する。

④A区の「初日の接近度」-A区の「1週間後の接近度」=A区の「1週間で縮まった距離」とする。

⑤対象18区、県の伝播密度上位3データの平均値（25km/週）を伝播速度として採用する。

(3) 感染源地域の特定

北京市の初期発症者を收容し、原因が不明を理由に他の患者との接触規制が徹底しないため感染者の拡大を招いた海淀区にある302病院を感染源と設定し、伝播速度を基に同心円を4/27~6/1の6週間分作成し、予測新規感染症数を求める。

海淀区：北京市は国貿地区（中心市街地東部）、天安門広場地区（中心市街地中央部）と海淀地区を含む中心市街地西部地区の三核構造となり、海淀区は中央官庁、大学（北京大学、清華大学等）、ハイテクパーク、住宅地で構成されており市内各地から通勤者が多い。

(4) 予測式に基づく空間解析(図5)

人口密度(x)と発症者密度(y)は相関関係が高いことを基に以下の方法により発症者予測を行なう。

①18区、県の「人口密度」と「発症者密度」を直線回帰させると、 $y=1.1921x$ （第1週の相関係数0.913）となり、この式から、A区「発症者密度予測」= $1.1921 \times$ A区の「人口密度」であるから、仮に1週間後にA区の半分の地域に伝播していると仮定し発症者予測式を作成する。

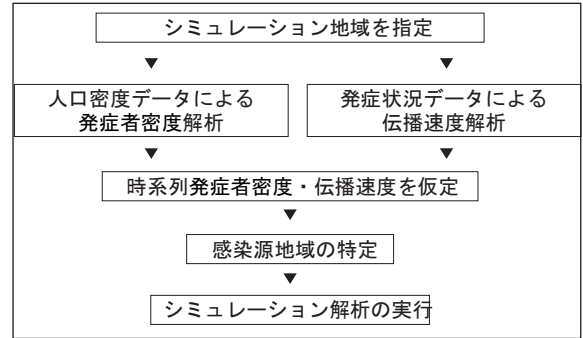


図4. 感染症伝播解析の手順

表4. 区県別発症データ

区県名	2003/4/27	第1週	第2週	第3週	第4週	第5週	第6週	計
朝陽区	8	77	86	83	10	5	0	269
昌平区	1	9	47	1	1	3	0	62
門頭溝区	0	3	0	0	0	1	0	4
東城区	22	134	68	21	5	5	0	255
宣武区	4	56	19	3	0	2	2	86
通州区	16	74	48	9	11	0	0	158
西城区	6	106	25	25	5	2	0	169
海淀区	28	231	117	38	24	6	0	444
房山区	1	6	3	0	1	0	0	11
順義区	0	7	1	4	2	0	0	14
崇文区	5	29	6	3	3	0	0	46
石景山区	20	61	46	2	3	0	0	132
密雲県	0	0	1	0	0	0	0	1
延慶県	0	2	0	6	2	0	0	10
平谷区	0	0	0	0	0	0	0	0
大興区	7	16	9	2	9	0	0	43
豊台区	7	59	25	12	12	1	0	116
怀柔区	1	4	2	1	3	0	0	11
合 計	126	874	503	210	91	25	2	1831

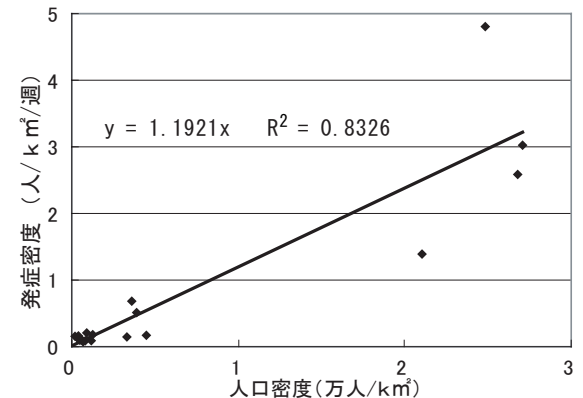


図5. 人口密度と発症者密度の相関

A区の1週間後の「発症者予測数」=A区の「発症者密度予測」×A区の1週間後の「伝播面積比率」

②感染源302病院を中心として、1週目は25kmの円内に伝播、2週目は50kmの円内に伝播と設定し、各週の伝播円内に含まれる各区の面積比率（伝播面積比率）を算出し、各週の各区発症者予測数を求める。予測式における各区、県の発生比率と実績値における6週間の相関係数が0.857と高い相関を示しているため、予測式（感染症伝播解析システム）の信頼性は高いものと判断する。

4. 3. 都市空間の安全性への考察（北京市における伝播特性）（図6、図7、図8参照）

SARS伝播解析シミュレーションから北京市における伝播特性について以下のように考察する。

・北京市における発症源と推測される302病院を含

む海淀区の新規発症例数実績比率が予測比率を上回っている。このことは発症者完全隔離の未徹底等による初期の措置が適切性を欠いたため、伝播規模の拡大につながった状況を示している。

・同様に予測比率を上回る実績比率を示している北京市の各区、県は、必ずしも海淀区の隣接区に限定されている訳では無く、北京市内移動の拡大化が示されている。

5. まとめ

以上の三段階の属性における解析から得られた考察について以下にまとめる。

世界各国および北京市の分析結果から考察すると、

- ・新種の感染症に対しては各国の発症者パターンから発症者の完全隔離による効果が高いことが指摘できる。
- ・香港の事例研究では高密度市街地における都市活動の制限が検討課題として抽出される。

我が国においては、過去の事例より鳥インフルエンザや0157等の法定伝染病に指定されていない新種の感染症に関しては伝播防止に重要な初期段階における効果的な措置を実施することが困難な状況である。とくに、我が国は都市化が進展しており、市街地における感染症伝播抑制の方策を以下に考察する。

①情報の的確かつ迅速な開示

②防疫体制の確立

空港・港湾等の海外との接点における感染症病原菌の防疫を徹底。人的、物的な世界規模での移動に対する社会的認識を基にした侵入防御策の実施が課題となる。

③感染症伝播メカニズム解析手法の確立

今回のSARS伝播解析で明らかのように、流行初期における新種の感染症に関しては隔離期間の適切な設定が重要である。本稿ではその指針となる伝播解析の手法を構築した。新種の感染症伝播は、発症時に適切な処置（患者の隔離、患者の属する地域社会への対応等）が必ずしも実施されないために伝播拡大が発生するが、本システム等による感染症固有の伝播メカニズムを早期に解析し拡大防止に活用することが重要と結論付けられる。

今後の課題は、日常生活領域における感染症伝播防止を科学的かつ合理的に実施するため、地域レベルでの感染症発症に関する詳細データの整備、公開が望まれる。我が国では個人情報保護との関連で詳細データの公表が実施されていないため、研究者にとって詳細データの入手が困難となっているが、コード化等により個人を特定できない情報公開の実現が望まれ、発症者の位置、発症時間を基に正確な伝播時間距離が求められるため高精度な感染症伝播予測が可能となる。

注釈

*1 First International symposium on Health GIS. 健康・医療分野における国際会議である。本稿に関連する研究として2005年Bangkokにおいて、1) Integrated Use of GIS to Design Preventive Strategies for Control and Monitoring the Transmission/Epidemics of HIV/Aids in North West Frontier Province (NWFP), Pakistan, 2) The Application of Geographic Information Systems (GIS) to illustrate geographical distribution of notifiable diseases in Saudi Arabia during the 1990s, 3) Epidemiological Modeling using GIS: case study of Dengue Fever等が発表されている。

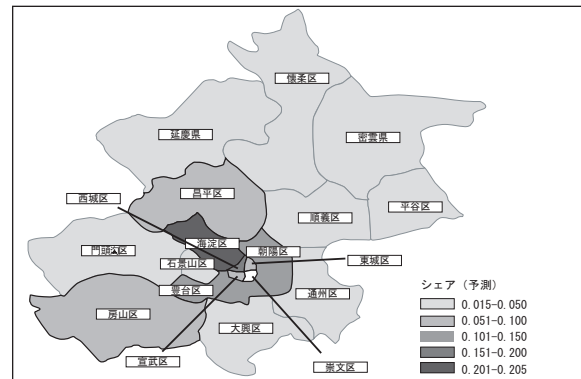


図6. 北京市の発症者予測値の区別シェア

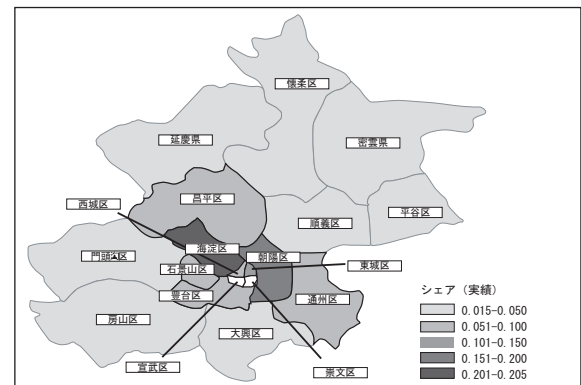


図7. 北京市の発症者実績値の区別シェア

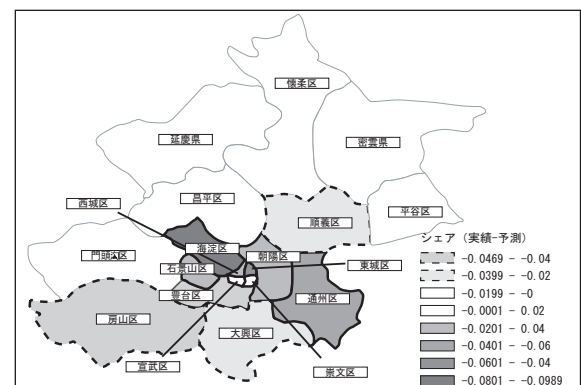


図8. 北京市の予測値と実績値と差異

引用文献

- 1) 佐藤充他、地理情報科学辞典（平成16年4月発刊 編集：地理情報システム学会）「9-1. 保健医療分野におけるGIS」
- 2) 中谷友樹：疾病・健康水準の空間分析. 総合都市研究63, 27-43.
- 3) 二瓶直子・小林睦夫(2000): 地理情報システムを利用した感染症分布の解析. 感染症30, 129-140.
- 4) 佐藤充、佐山哲也: 感染症伝播解析システム及びその伝播シミュレーションシステム, 出願番号 特願2001-76928 (P2001-76928), 公開番号 特開2002-279076 (P2002-279076A) 2001. 3. 16
- 5) de Lepper, M. J. C., Sholten, H. J. and Stern, R. M. eds. (1995): The Added Value of Geographical Information Systems in Public and Environmental Health. Kluwer.
- 6) Gatrell, A. and Loytonen, M. ed. (1998): GIS and Health. Taylor and Francis, London.
- 7) Hay, S., Randolph, S. E., and Rogers, D. J. eds. (2000): Remote Sensing and Geographical Information Systems in Epidemiology. Academic Press.
- 8) Mead, S. M. and Earickson, R. J. (2000): Medical Geography Second Edition. The Guilford Press.
- 9) Nakaya(2000): Geomedical approaches based on geographical information science: GIS and spatial analysis for health researches. Proceedings of ASIA GIS 2001 (CD-ROM).