

D. 結論

中長期的な水質汚染リスクに対する GIS の有効性の確認に続き、短期的な水質汚染リスクにも GIS の適用が有効であることが確認された。すなわち、GIS として汎用的に整備されている空間検索（水質異常発見箇所の上流流域の中に含まれる特定事業場の検索）、最短距離検索（特定事業場から取水地点までの距離算定）、ネットワーク解析（上流河川、下流河川の追跡）の各種解析機能が、水質汚染事故時の迅速な対応を可能にすることが明らかとなった。

GIS と連動して動かすことができる汎用的なデータベースソフトを用いることによって、水質事故記録を管理でき、水質事故時の過去の対応策を把握することで、類似の現象に対する対応策検討の支援が可能になった。また、水質汚染事故データベースに、画像や音声を記録するなど、マルチメディアに対応することで、より情報の多様化が図れ、記録を把握しやすいものとなった。

以上のソフト機能を作成し、ケーススタディー流域での実際のデータ入力を行い、作成した機能の有効性を確認した。また、現状においては、河川の流速などの把握の困難性から流下時間の算定は精度が期待できないなど、幾つかの課題についても整理を行った。

E. 健康危険情報

なし

F. 研究発表

なし

G. 知的所有権の取得状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

分担研究報告書 2

水系感染症リスク評価技術の開発

分担研究者 津野 洋
研究協力者 永禮英明

水系感染症リスク評価技術の開発

分担研究者 津野 洋 京都大学大学院工学研究科 教授

研究協力者 永禮英明 京都大学大学院工学研究科 講師

研究要旨

地理情報システムを用い、水系感染症による健康リスクを評価する技術について検討を行い、プロトタイプ製作を行った。対象とする感染症は主に水を媒介として発生し、現時点において国内で発生が報告されているものであるが、未知の微生物による感染症発生も考慮できるようにした。多くの感染症に対応できるように、評価システムは柔軟な構造となるよう検討した。また、1996年に埼玉県越生町にて発生したクリプトスポリジウムへの集団感染について、開発したモデルの適用を検討した。

A. 研究目的

近代の上水道および下水道の建設、および医療保健体制の充実により、日本国内における水系感染症の発生数は劇的に減少した。しかし、発生は全くなくなったわけではない。

日本は高齢化社会を迎え、今後より一層高いレベルでの感染症予防が必要になると予想される。国立社会保障・人口問題研究所の予測では、2050年には65歳以上の人口が2000年の1.6倍に相当する約3,600万人にまで増加し、その一方で、14歳以下の人口は2000年比0.6倍の1,000万人に減少すると予想されている。老人および子供は成人に比較し免疫力が弱く、感染症にかかる確率が高い。そのため、高齢化が進展した社会においては、まず老人感染患者数の増加が予想される。次に、子供の患者数は人口の減少に伴い減少するが、高齢化社会の進展に伴い子供一人当たりには付与される社会的期待・責任は大きくなり、たとえ感染症の発生確率が現在と同じとしても、より一層社会的な問題となる可能性がある。これらの理由から、日本においては従来以上に感染症に対する取り組みが必要である。

感染症に関する健康リスクの評価方法として、化学物質に関する用量-反応モデルをもとに、摂取した微生物量に対する感染確率あるいは発病確率を推計するモデルが提案されている^{2,3)}。また、感染症特有の問題である感染の拡散についても、患者数の時間変化を計

算するものが提案されている⁴⁶⁾。例えば、Chickら⁵⁾のモデルでは、ある集団を感染の可能性のあるグループ (S)、感染したグループ (I)、病気から回復したグループ (R) に分け、この他に環境中の微生物 (W) を考慮し、各グループおよび微生物の時間変化を計算している (図1を参照)。ここで、感染の確率は化学物質での用量-反応モデルと同じ指数関数モデルが用いられている。

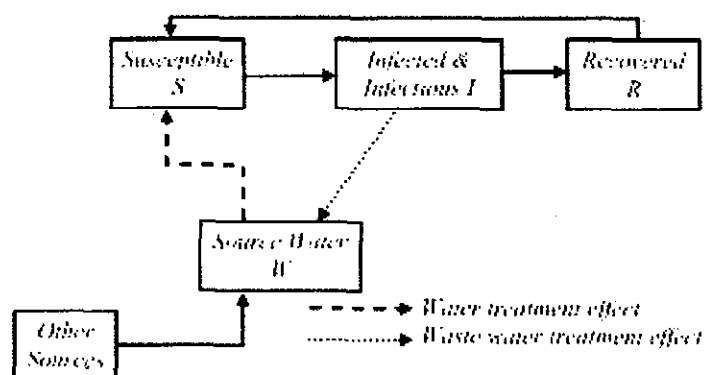


図1 感染症拡散モデル⁵⁾

これらのモデルは、ある地域における患者数を予測するモデルである。このモデルにより、他の社会と接触を持たない閉鎖的社会における損失の大きさは評価されるが、現代のように社会と社会が密接に関係しあう環境においては相当量の誤差が含まれると予想される。

本研究では、地理情報システムを用い、感染症の伝播(拡散)を空間的に予測するモデルのプロトタイプを構築した。主に考慮する感染症は従来までに報告されている水系感染症としているが、現在は見つかっていない新たな感染症への対応も考慮した。また、1996年に埼玉県越生町にて発生したクリプトスポリジウムへの集団感染について、本モデルの適用を検討した。

B. プロトタイプモデルの構築

1. モデル全体像

水系感染症リスクを空間的に扱うには図2のようなモデルが必要と考える。モデルは大きくは病原性微生物輸送モデルとヒト行動モデルの2つのモデルで構成される。病原性微生物輸送モデルでは、養豚場、養鶏場等の畜産施設からの病原性微生物の排出、河川中での流下、上水道施設での取水・処理・配水、下水道施設中での流下・処理・放流を扱う。一方、ヒト行動モデルはヒトの行動様式をモデル化したもので、ヒトへの感染ならびに感染患者による病原性微生物の輸送を扱う。

モデル計算においては各種の統計情報ならびに地理情報を用いる。いずれのモデルも計

算には種々の情報を必要とする。例えば病原性微生物輸送モデルでは発生源の位置、曝露区域、輸送経路に関する情報が必要である。また、発生源位置を設定するためには畜産施設等の位置が必要であり、これは水道事業体が作成していると考えられる流域内の特定事業上等を記載した地図（流域環境図など）をもとに作成することになる。

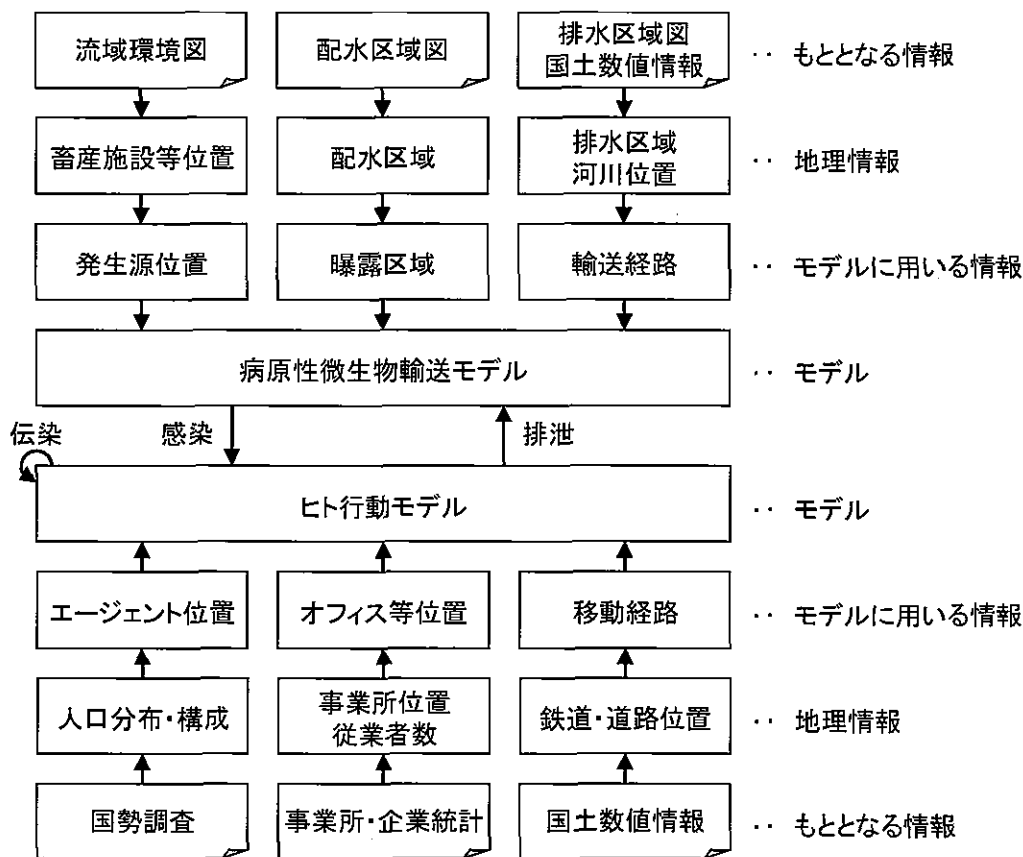


図2 モデル全体像

2. プロトタイプ

2.1 マルチエージェント・シミュレーション

まず、図2に示したモデル全体像のうち、主にヒトの行動とヒトによる病原性微生物の輸送に関する部分についてプロトタイプを作成した。今回開発したモデルでは、マルチエージェントと呼ばれる技術を用いている。エージェントとは個人、あるいは集団を表す計算上の物体で、計算対象となる地域にはエージェントが多数配置され、地域内を各々異なるパターンで行動する。

2.2 計算条件とエージェントの行動ルール

今回のシミュレーションモデルでは4×4 kmサイズの仮想的な地域を設定した。この地域には4つのオフィスと300個のエージェントが配置されている。図3に対象地域の初期条件を示す。

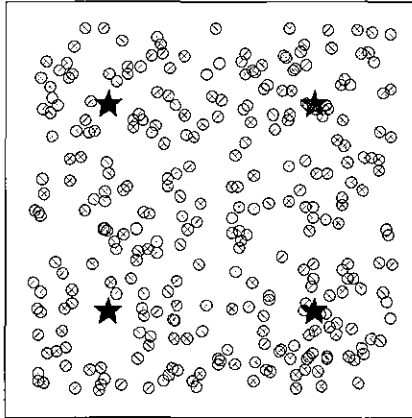


図3 計算対象地域の初期条件

小さな丸はエージェントを、4つの星型の図形("★")はオフィスを表す。
エージェントは4つのうちいずれか1つに勤務する。エージェントの数は300。

今回のプロトタイプモデルでは、エージェントの種類は1つのみ、すなわち労働者を模倣するエージェントのみとした。エージェントは毎朝オフィスに出かけ勤務し、ときどき別のオフィスへ出向く。勤務時間が終了すると自宅へ戻る。各エージェントのオフィスは地域内に設けられた4つのうちの1つから、計算開始時にランダムに設定される。自宅の位置も同様にランダムに設定される。ただし、これらの情報は計算期間中を通じ保持され、変更されることはない。

計算開始時に、自宅からの出勤時間は朝の7時から9時の間でエージェントごとにランダムに、同様に帰宅時間も17時から19時の間でランダムに設定される。各エージェントは規定の時刻になると自宅からオフィスへ移動を開始し、4 km/hr の速度で移動する。勤務時間中、同じオフィスにいるエージェントの中からランダムに少数のエージェントを選択し(各エージェントの選択確率0.5%)、別のオフィスへ出向かせる。移動先のオフィスは現在位置を除く残り3つのオフィスからランダムに選択する。帰宅時間になると現在位置から自宅へ移動を開始視する。

2.3 病原性微生物による感染

本研究では Eisenberg et al.⁴⁾, Chick et al.⁵⁾らの感染症モデルを参考に病原性微生物による感染、感染状態の変化に関するモデルを作成した。ただし、ここでは単純化のため、環境中(飲料水を含む)に存在する病原性微生物による感染を無視し、ヒトからヒトへの伝染のみを考慮した。この設定は腸管系の病気が多い水系感染症では考えにくいものであるが、新興の感染症も考慮していること、ここでは適用性のみを示すことから、このような設定を行っている。

感染状態のエージェントの周囲に未感染のものが多数存在する場所(例えばオフィスな

ど)では、確率 β で感染が起こる。各々のエージェントでの感染の生起は計算機の乱数を用い決定した。感染が起こると、そのエージェントの状態は未感染から感染へと変化し、他の未感染者へ伝染することができるようになる。 τ_1 で定義された時間経過後、感染状態のエージェントは病気から回復する。この時、免疫を獲得し、 τ_2 で定義される時間までの間、再度感染することはない。

3. シミュレーション結果

3.1 エージェントの行動

図4にはあるエージェントの1日の移動経路を示す。朝、このエージェントは自宅(図中"+")からオフィス(図中①)へ出勤した。日中、2回の移動(①→③, ③→②)をし、夜に帰宅した。これはエージェントの典型的な移動パターンであるが、エージェントによっては日中1回も他のオフィスへ移動しないものもある。

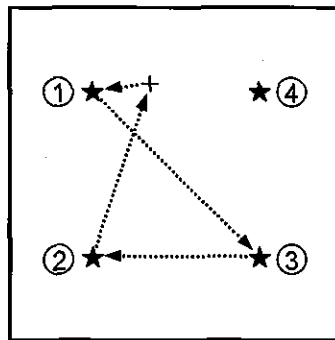


図4 あるエージェントの1日の動き

朝、自宅("+")を出発し左上のオフィス("★"①)へ出勤する。日中、2回の移動を行った：①→③, ③→②。夜には出先の②から自宅へ戻った。

図5には8時と14時での状況を示す。朝8時には既に出勤を開始したものもあれば、まだ自宅にいたものもある。14時ではほとんどのエージェントはオフィスにて就労しているが、少数のものは別のオフィスへ移動中である。

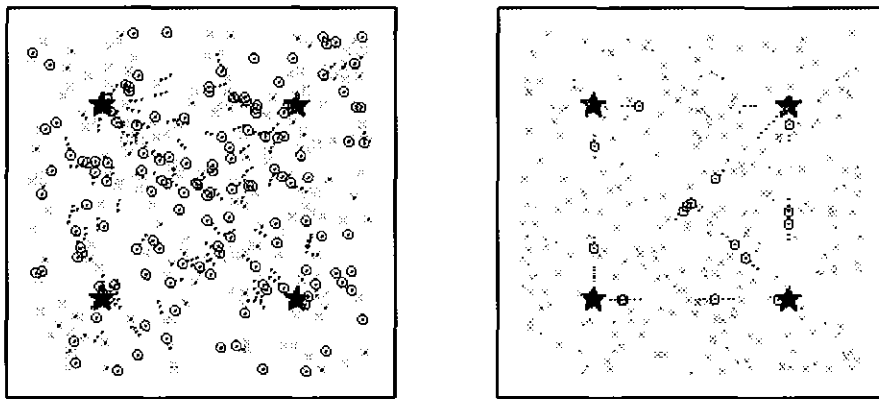


図5 朝8時（左）と日中14時（右）の様子

3.2 感染を考慮したシミュレーション

上記の行動モデルにヒトからヒトへの伝染を加味し、シミュレーションを実行した。シミュレーションでは感染確率 (β)、感染状態から回復に要する時間 (τ_1)、感染により獲得した免疫が失われるまでの時間 (τ_2) は各々 0.24 day^{-1} 、3 hrs, 3hrs とした。通常の感染症に比較し感染確率は非常に大きく、他の2つの時間については非常に小さな値であり、現実的なものではない (c.f. エンテロウイルスでは $\beta=0.01\sim 0.1 \text{ day}^{-1}$, τ_1 and $\tau_2 = 0.5\sim 5 \text{ days}$, Eisenberg et al., 2004)。これらの数値は本シミュレーションの適用性を簡潔にデモンストレーションするために設定したものである。

1日の最初に、左下隅にある5つのエージェントを感染状態と設定した (図6参照)。感染状態のエージェントは通常のものと同様に行動し、未感染のエージェントを伝染させる。感染者数の変化を図7に示す。時間の経過とともに感染者数 (図中の "I") は増加を続ける。感染から回復したものの数 (図中 "R") は感染者数に遅れ、同様の経過をたどる。1日の終了時 (20時) には、感染者または回復者は計算領域全体に分布しており、朝の状態 (左下隅にのみ分布) から広がっていることがわかる (図6参照)。このように、マルチエージェントモデルにより、感染症の拡散をシミュレーションすることができる。

シミュレーションでは同じパラメータを用い何度か計算を行った。その中で、感染者数の最大値が計算ごとに異なっていた。エージェントの住居・職場の位置、行動パターンが計算ごとに異なっていたことが原因であった。この結果は、感染確率だけでなく、人々の行動パターンが感染症の拡散に影響を及ぼすことを示している。

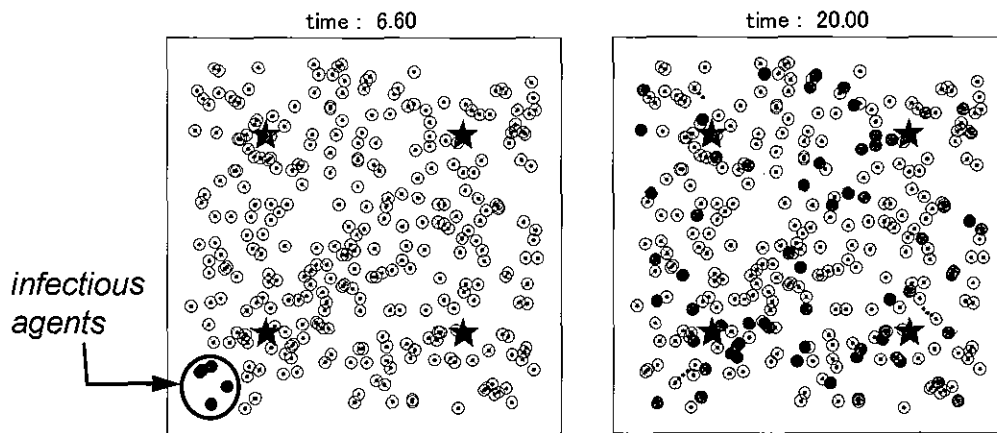


図6 計算開始直後（左）と1日の計算終了時（20時，右）の状況
ハッチングされた”○”が感染または回復したエージェントを表す。

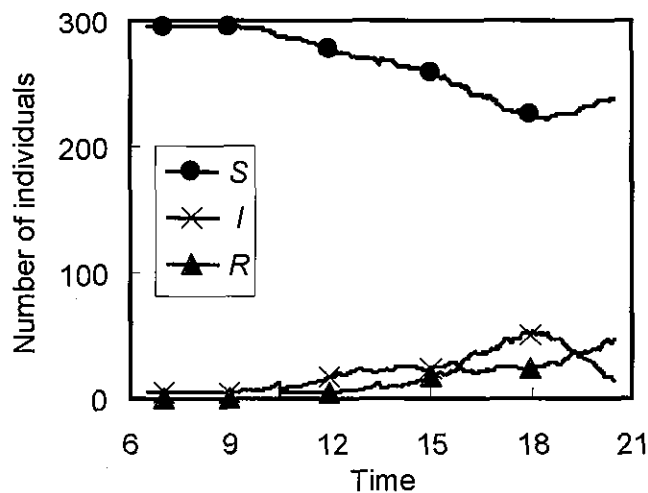


図7 未感染 (S), 感染 (I), 回復 (R) の各状態にあるエージェントの数の変化(S)
感染者数は計算開始時5人であった。

C. 埼玉県越生町クリプトスポリジウム集団感染への適用

1. はじめに

1.1 本章の目的

本章では、1996年に埼玉県越生町にて発生したクリプトスポリジウムへの集団感染について、上述のマルチエージェント技術を用いた感染症拡散に関するシミュレーションの適用を検討し、その可能性を把握することを目的とする。

1.2 越生町クリプトスポリジウム集団下痢症の概要

越生町で発生したクリプトスポリジウムによる集団下痢症（以下、集団下痢症）について、坂戸保健所の報告書⁷⁾をもとに概要を示す。

越生町は面積 40.44 km²、人口 13,868、世帯数 4,252 世帯（いずれも平成 9 年 2 月現在）の、周囲を奥武蔵の山並みに囲まれた自然環境豊かな町である。

図 8 には越生町の水源周辺の様子を示す。町には浄水場（急速ろ過法）が 1 つあり、この浄水場は 3 つの水源から水を得ている。第 1 水源は越辺川伏流水、第 2 水源は麦原川表流水、第 3 水源はトンネル湧水である。さらに利根川表流水を水源とする埼玉県企業局の県水を導入している。両系統の排水管が管網として接続されているため、給水区域は明確には区分されていない。

浄水場の上流 0.4 km に 75 世帯が利用する農業集落廃水処理施設（第 2 浄水センター）、さらに 0.8 km 上流には 38 世帯が利用する同様の施設（第 1 浄水センター）がある。これら施設では接触曝気法による処理が行われ、越辺川へ排水している。

畜産農家は馬飼育農家 2 軒、牛飼育農家 1 軒の合計 3 軒であるが、いずれも浄水場下流に位置する。

集団下痢症の第 1 報は平成 8 年 6 月 10 日に越生町保健センターから坂戸保健所に「小・中学生に原因不明の集団下痢が発生している」という内容でもたらされた。その後、下痢は保育園児、高等学校生徒、町内の一般住民にも拡大した。6 月 18 日に患者の便から、6 月 20 日には町の水道水からクリプトスポリジウムが検出された。6 月 27 日に水源を全て県水に切り替えた後、下痢や腹痛などの発症者、小・中学生等の欠席者数も徐々に減少し、7 月 19 日に「水道水の安全宣言」が出された。越生町全住民を対象にした健康調査結果によると、下痢や腹痛などの症状のあった者は回答者の約 7 割にも達した。

麦原川原水が汚染されたのは、上流の住民の家庭用浄化槽から原虫が排出されたことによると考えられている。水源である麦原川が原虫に汚染され、それが水道水に混入したこと、そして原虫がヒトの腸管で増殖し、便とともに排出されたこと、その結果、浄水場上流にある 2 つの浄水センター（廃水処理施設）からの排水によって越辺川が汚染されたという「循環増殖系」によるとされている。

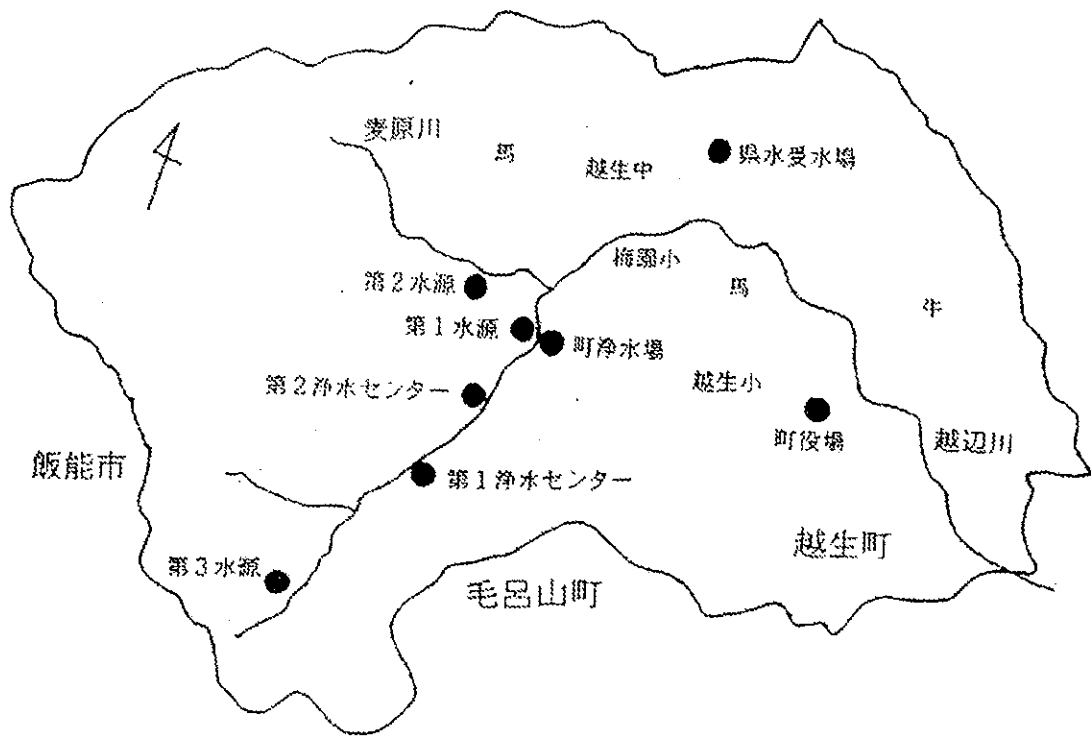


図8 越生町の水源地周辺図⁷⁾

2. モデルの概要

2.1 対象地域の設定

計算対象となる越生町およびその内部の行政界は総務省 GIS プラザ (<http://gisplaza.stat.go.jp/GISPlaza/>) にある町丁・字等境界データ (以下、境界データ) を使用した。

境界データには越生町内各地区の世帯総数が記載されている。これに基づき各地区の住宅数を決定した。住宅位置は国土地理院細密数値情報 (10m メッシュ土地利用) から越生町内の住宅地の位置を抽出し、その中から住宅数と同数のメッシュをランダムに選択した。

集団下痢症発生時の人口はおよそ 13,800 人であるが、今回は計算時間の都合上、この 1/10 の 1,380 のエージェントを配置した。エージェントの年齢、性別は平成 12 年国勢調査町丁・字等別集計に基づき設定した。ただし、年齢については 15 歳未満、15~64 歳、65 歳以上の 3 区分、さらに 15~64 歳の区分については性別を加味し、最終的に 4 区分とした。

2.2 クリプトスポリジウムの移動と感染

クリプトスポリジウムによる感染と状態の変化は Eisenberg et al.⁶⁾ を参考に図 9 のように設定した。クリプトスポリジウムに対し免疫を持たず感染の可能性のあるエージェント (S) はクリプトスポリジウムを摂取した際、確率 β で感染し潜伏期間 (L) に入る。平均 τ_1 (=4 日) の時間経過後、 L の状態にあるエージェントは発症し状態 I となる。 L および

I の状態にあるエージェントは各々1日100個、10,000個のオーシストを排出する。平均 τ_2 (=14日)の経過後、 I の状態にあるエージェントは感染症から回復し、状態 R となる。この状態ではオーシストの排出はなく、また免疫を獲得しているため再度感染することもない。免疫は平均 τ_3 (=300日)後に失われ、再び感染の可能性のある状態(S)となる。オーシスト摂取による感染の確率は次式で計算した。

$$\beta = 1 - e^{-rd} \quad (1)$$

ここで、 r は年齢により決まる係数、 d は摂取するオーシスト数で、飲料水量と水道水中オーシスト濃度の積として計算される。1日の飲料水量は年齢別に設定し、0.5~1L/日とした。環境中のオーシストは状態 L および I のエージェントから排出されるもののみを考慮した。糞便とともに排出されたオーシストは廃水処理施設を経て河川中へ排出される。浄水場の第1および第2水源よりも上流に位置する家屋から排出されたオーシストは河川を流下した後に取水され、浄水場・配水池を経て家庭にもたらされる。現実には廃水処理、河川流下、上水・配水の各過程でオーシストの除去・不活化が生じているが、今回は簡単化のためこれらの除去・不活化はないものとして扱った。

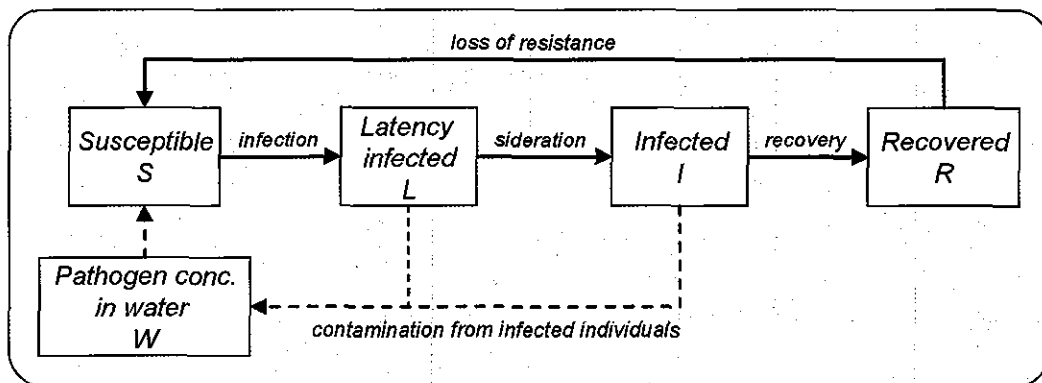


図9 感染状態の変化

2.3 エージェントの行動

エージェントの行動は年齢、性別により異なる。

1) 15歳未満

学校へ通う。平均朝8時(時間幅±30分)に通学し、夕方4時(±30分)に帰宅する。今回は町のほぼ中央付近に学校が存在するとした。

2) 15~64歳(男性)

平均朝7時(±2時間)に出勤し、夜7時(±2時間)に帰宅する。勤務地は全て町の外部とする。

3) 15~64歳(女性)

家事が主であるが、午後2時~4時(±1時間)の間、買い物等のために外出する。

4) 65歳以上

6～12時の間に自宅を離れ、12～午後6時の間に自宅へ戻る。外出先は町の中に3カ所任意に設定した。

2.4 計算方法

越生町の事例では、最初麦原川上流に住む住民が感染し、感染者からの排泄物から越生町全体へ感染が広がった。そこで、シミュレーション開始時に麦原川上流付近のエージェント全てを感染状態とし、計算を実行した。感染源はこれら初期状態で感染状態にあるエージェントのみとしている。

計算は50日間、30分刻みで実行した。

3. 計算結果

計算結果を感染状態別の人数の変化として表したものが図10である。計算初期、ほとんどのエージェントはクリプトスポリジウムに対し免疫を持たない状態(S)であったが、日数の経過とともに感染(潜伏)状態(L)が増加し、400時間目頃からは発症者数が増加している。

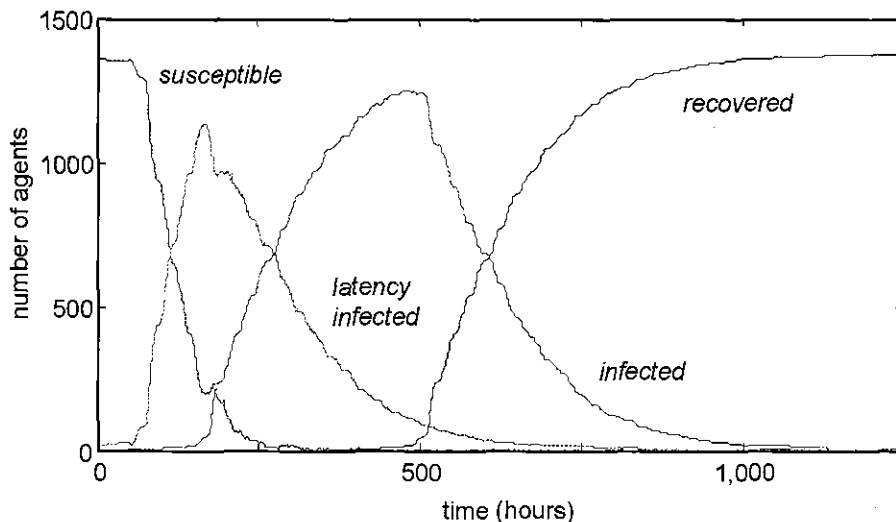


図10 感染状態別の人数の変化

図11には感染者の拡散状況を示す。図中の丸はエージェントを表し、その色は感染状態を示している(図中脚注を参照)。計算初期(1日目)には麦原川上流にのみ感染患者が存在していた。この患者からオーシストが排出され、浄水場を経て各過程へもたらされた。上水の摂取により感染が広がり、5日目にはほぼ町のほぼ全域に感染が広がっている様子がうかがえる。ただし、その多くはまだ発症していない。10日目には発症者が増加し、その一方で5日目にはまだ未感染であったエージェントも感染している。25日目には回復したものが増えているが、まだ発症している状況のものも多い。50日目までには全てのエージェントが回復し、免疫を得た状態となっている。

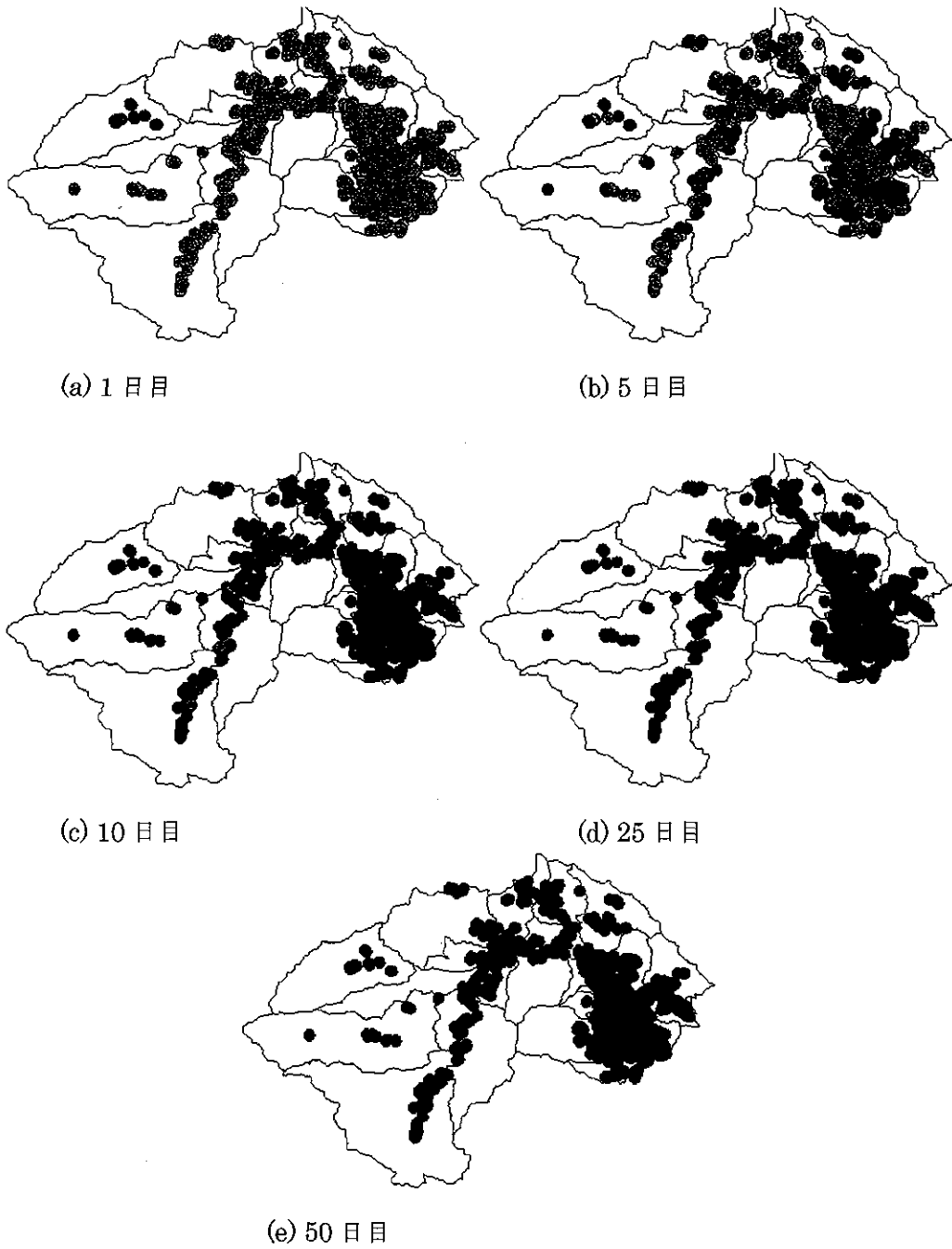


図 11 感染拡散の状況

図中の丸はエージェントを表す。エージェントの色は感染状態を表す。
 (緑：感染可能, ピンク：感染 (潜伏), 赤：感染 (発症), 青：回復)

このように、本研究で作成したモデルは従来と同様に患者数の変化を推定するだけでなく、患者数の空間的な分布およびその時間変化を推定することも可能となっている。

4. 成果および今後の課題

モデル上では麦原川流域から越生町全域へ感染が拡散していく様子、ならびに感染者数の変化が表現でき、従来のモデルでは得られない詳細な情報が得られる可能性を示した。

今回のモデルでは水処理過程、河川流下家庭でのオーシストの減少・不活化を考慮していない、年齢構成・行動様式の分類が不十分など、今後改良する必要がある。これらの改良により、より現実に即したモデルが構築でき、越生町で実際に生じた現象をより詳細に把握し、さらには様々な想定の下で同様の事例について予見的検証が可能になると考える。

予見的検証では、年齢構成の違い（高齢化の進展による感染者数の増加）、行動様式による違い（外部との交流が及ぼす影響等）、処理過程の変更等について評価が行えると考えている。

D. 結論

地理情報システムを用い、水系感染症による健康リスクを評価する技術について検討を行い、プロトタイプ製作を行った。さらに埼玉県越生町で発生したクリプトスポリジウム集団感染に本モデルを適用した。プロトタイプでは従来のリスク評価モデルとは異なり、感染者、感染リスクの空間的な差違を考慮でき、より現実に近い評価が行えることが示された。また、越生町への適用では、本モデルが実際の水系感染症発生にも適用できることが示された。環境中での微生物の移動、ヒトの行動様式等、モデルを改良することにより、より詳細で精度よい評価が可能となり、また、様々な想定の下で同様の事例について予見的検証が可能になると考える。

E. 研究発表

- 1) Nagare H and Tsuno H (2004) Development of Waterborne Disease Transmission Model based on Multi Agent Simulation Technique. The 8th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment, Shanghai Jiao Tong University, P.R. China.

(参考文献)

- 1) 国立社会保障・人口問題研究所 (2002) 日本の将来推計人口 (平成14年1月推計)
- 2) U.S. Environmental Protection Agency (1989) National primary drinking water regulations; filtration and disinfection; turbidity; Giardia lamblia, viruses, Legionella, and heterotrophic bacteria. Fed. Reg. 54(124), 27486-27541.

- 3) Haas CN, Rose JB, Gerba CP (1999) Quantitative microbial risk assessment. New York: John Wiley & Sons, 449.
- 4) Eisenberg JN, Seto EYW, Olivieri AW, Spear RC (1996) Quantifying water pathogen risk in an epidemiological framework. Risk Anal, 16, 549-563.
- 5) Chick SE, Koopman JS, Soorapanth S, Brown ME (2001) Infection transmission system models for microbial risk assessment. The Science of the Total Environment 274, 197-207.
- 6) Eisenberg JN, Brookhart MA, Rice G, Brown M, Colford JM (2002) Disease Transmission Models for Public Health Decision Making: Analysis of Epidemic and Endemic Conditions Caused by Waterborne Pathogens. Environmental Health Perspectives, 110(8), 783-790.
- 7) 埼玉県坂戸保健所クリプトスポリジウムによる集団下痢症事件報告書作成チーム (1997) クリプトスポリジウムによる集団下痢症事件報告書.

研究成果の刊行に関する一覧表

研究成果の刊行に関する一覧表

1. 論文発表

- 1) Hideaki NAGARE and Hiroshi TSUNO. Development of Waterborne Disease Transmission Model based on Multi Agent Simulation Technique. Proceedings of The 8th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment, pp.27-32(2004).
- 2) 永禮英明. 水環境シミュレーション 水質汚濁機構の解明. 日本水環境学会関西支部支部設立20周年記念・第10回情報ネットワーク講演会, pp.5-8(2005).

2. 学会発表

- 1) 森 一晃, 国包章一, 津野 洋, 水道原水保全における地理情報システム (GIS) の活用. 第55回全国水道研究発表会, pp.118-119(2004).

研究成果の刊行物・別刷