

図 5:通勤電車の利用者数

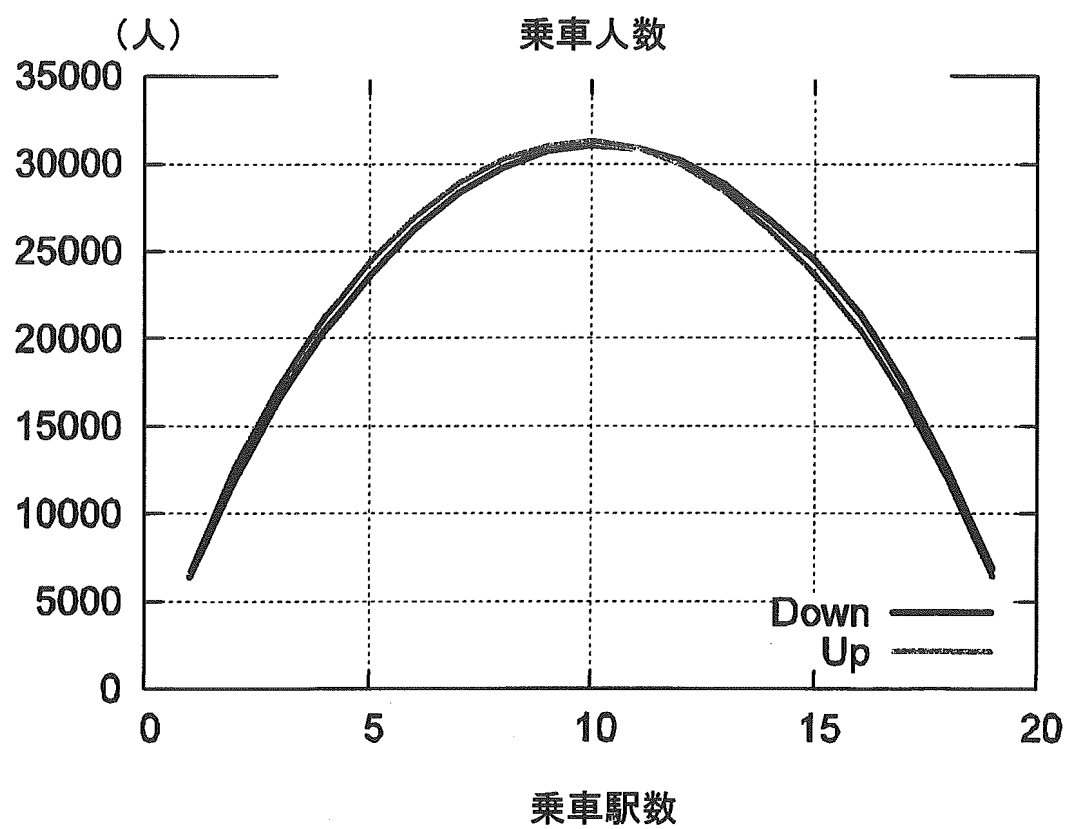
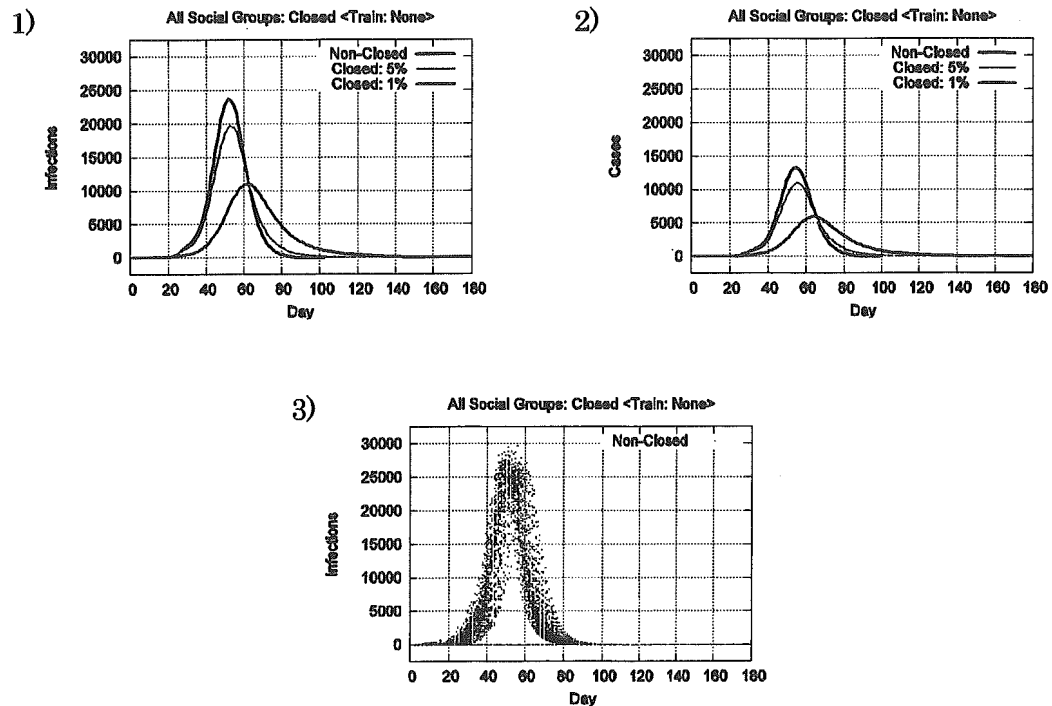


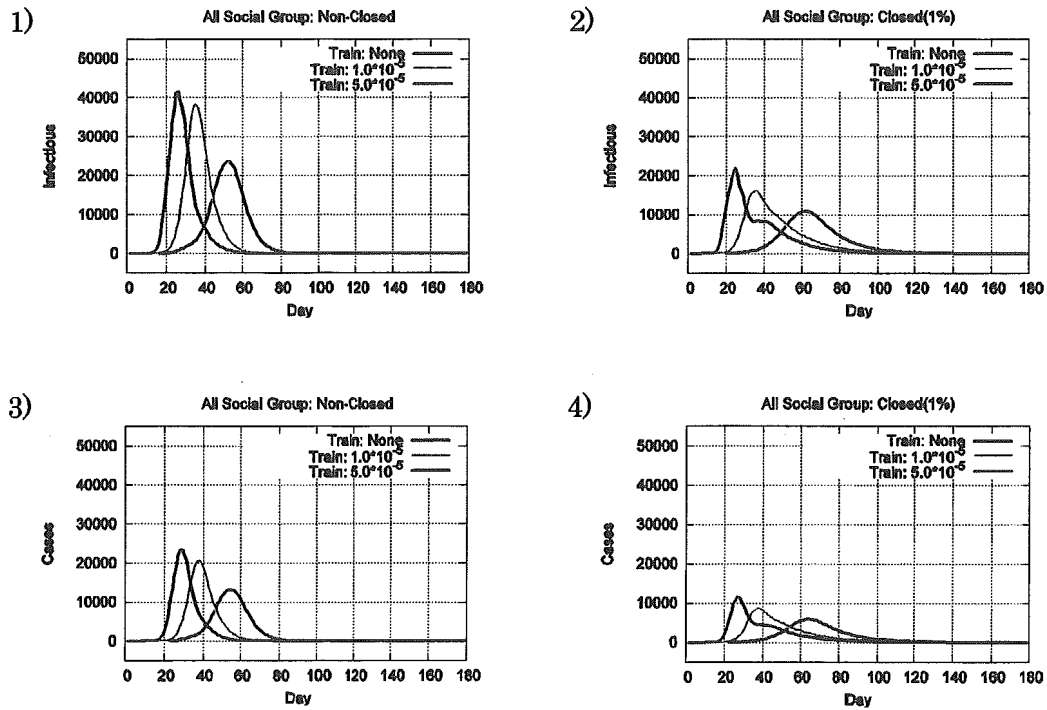
図6：新規感染者数・就床者数の推移



注：赤色は職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設の閉鎖を行わない場合、緑色は職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設を欠席・欠勤率5%で閉鎖を行う場合、青色は欠席・欠勤率1%で閉鎖を行う場合を示す。シミュレーション100回中、Outbreakしたケースの平均をとる。通勤電車での感染がないと仮定。

- 1) 新規感染者数の推移。横軸は初発例が曝露を受けてからの経過日数、縦軸は各日における新規感染者数。
- 2) 就床者数の推移。横軸は初発例が曝露を受けてからの経過日数、縦軸は各日における就床者数。
- 3) 1)の赤線の場合における新規感染者数の分布。

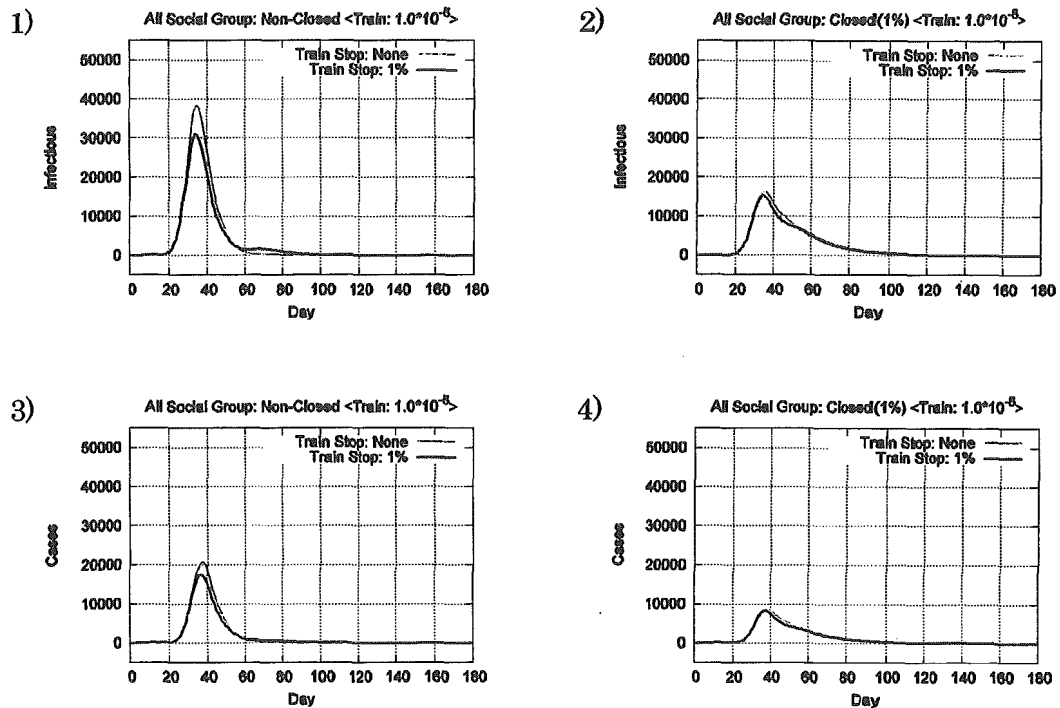
図 7：通勤電車での感染率の影響



注：通勤電車での感染率の影響を図示している。赤色は通勤電車での感染を考慮しない場合、緑色は通勤電車での感染率が低率の場合、青色は高率の場合を示す。

- 1) 新規感染者数の推移。職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設の閉鎖を行わない。
- 2) 新規感染者数の推移。職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設を欠席・欠勤率 1%で閉鎖。
- 3) 就床者数の推移。職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設の閉鎖を行わない。
- 4) 就床者数の推移。職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設を欠席・欠勤率 1%で閉鎖。

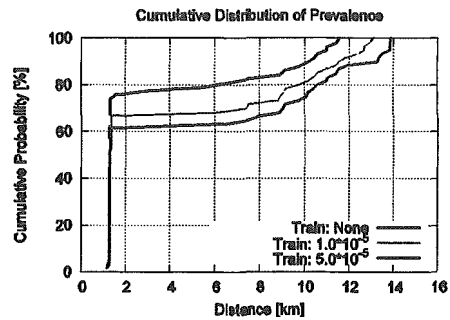
図8:通勤電車運行停止の効果



注：通勤電車での感染率は低率を仮定。緑色は通勤電車の停止しない場合を示す。桃色は都市全体の就床率が1%で通勤電車の運行を停止する場合を示す。

- 1) 新規感染者数の推移。職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設の閉鎖を行わない。
- 2) 新規感染者数の推移。職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設を欠席・欠勤率1%で閉鎖。
- 3) 就床者数の推移。職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設の閉鎖を行わない。
- 4) 就床者数の推移。職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設を欠席・欠勤率1%で閉鎖。

図9:感染拡大半径の分布



注：就床者が累積で 20 人に達した時点での、感染者の広がりを表している。横軸は初発例から最も遠くにいる感染者までの距離、縦軸はその累積確率である。赤色は通勤電車での感染がない場合、緑色は通勤電車での感染率が低率の場合、青色は高率の場合を示す。

感染症の社会シミュレーションの基本モデル

分担研究者：出口弘^{*1}、金谷泰宏^{*2}、兼田敏之^{*3}、小山友介^{*1}、市川学^{*1}、田沼英樹^{*1}

^{*1}東京工業大学、^{*2}防衛医科大学校、^{*3}名古屋工業大学

deguchi@dis.titech.ac.jp

研究要旨：本研究では、社会シミュレーションに基づいた、大規模感染症の予測のための基礎モデルの開発と、その対策プログラムの策定に関する分析を行った。ここでは、大規模感染症の社会シミュレーションのための基本モジュールを病態モジュール、感染モジュール、人間活動モジュールの三つに分けて設計し、これらをエージェントベースの社会シミュレーション言語SOARSの上で実装するための評価試験を行った。また、それぞれのモジュールに関連した疫学的対策を区分することにより、対策の構造化を行った。この対策モデルに基づきプログラム&プロジェクトマネジメントによる社会的感染対策の計画と評価の枠組みについての設計も行った。

1 モデルの全体構造

A. 研究目的

この研究では、天然痘を含む広範な感染症の社会シミュレーションのためのモデルの基本設計と社会的な感染症防止のためのプログラム&プロジェクトマネジメントへの我々のシミュレーション利用の方法を明らかにすることを目的とする。

大規模感染症は、歴史上多くの局面で当該の社会システムに大きな影響を与え、歴史的な大変動の原因となってきた。グローバル化した現代社会ではその影響は、局所的な文化や文明に留まらず、地球社会の共通の課題となる。他方で大規模感染症対策では、医療をコアとしながらも、社会の様々なステークホルダーとの連携で、様々なレベルの異なる対策を必要とする。ここでは社会システムの制度デザイン、とりわけプログラム&プロジェクトマネジメント(P2M)による機動的な対策の社会経済組織的なデ

ザインとインプリメントが必要となる。さらにそこでは社会的なインフォームド Consent やステークホルダーの参加による参加型アプローチが考慮されることが効果的対策の実現にとって必須となる。

これらの問題を総合的に考えていくためには、大規模感染症の広がりやその社会的な影響に関する効果的な『予測モデル』を社会の内部モデルとして共有することが極めて重要と考えられる。何らかの予測モデルを社会的な内部モデルとしたフィードフォワード型の対策プログラムの策定とその具体化したプロジェクトの計画と実施を、ステークホルダー間の価値の調整と社会的な学習含む形で実施することは今後のパンデミック対策で強く要請される。

そこで本研究では、社会シミュレーションに基づいた、大規模感染症の予測のための基礎モデルの開発と、その対策プログラムの策定に関する分析を行っ

た。

B. 研究方法

この研究では、大規模感染症の総合的な対策を考えるための基本となる感染予測の一般的なモジュールを構成する。また大規模感染症の社会シミュレーションと同時にその社会的な対策のプログラム策定、プログラムに基づいた個別の対策プロジェクトの計画とその実施のために如何にシミュレーションを利用するかを併せて分析する。

ここでは具体的には『インフルエンザ』を事例として、このモジュールの設計テストを行った。また併せて鳥インフルエンザの人型への変異を前提としたパンデミック対策のプログラム&プロジェクトマネジメントにこの社会シミュレーションをどのように利用することができるかを分析した。なお社会シミュレーションのプラットフォームとしては、東京工業大学の21世紀COEで開発中の、ドメインエキスパートにとってのエージェントベースシミュレーション環境であるSOARS(Spot Oriented Agent Role Simulator)を用いた。

【三つのモジュール】

感染シミュレーションのためのモデルは基本的に病態モジュール、感染モジュール、人間活動モジュールの三つのモジュールから構成される。第一の病態モジュールは感染症に罹患した場合の病態変化をモデル化したもので、感染症毎に異なるが、その基本構造は同型となる。ここでは鳥インフルエンザの変異型を事例に基礎モジュールを設計した。病態モデルの部分では、ワクチネーションや、入院、治療が対策の基本部分となる。

第二の感染モジュールでは、エージェントがスポットと呼ばれる場を移動することを前提として、感染のプロセスをモデル化している。我々は様々な感染症に適用可能な感染モジュールを設計することを目的としている。そのため感染のプロセスを、菌体の排出、場の汚染、エージェントの汚染、エージェントの感染に分けて、その間に菌体の排出や汚染のレベルに対して幾つかのスケール概念を導入している。またここでは感染対策を六つのフィルター概念で区分して、菌体の排出抑制、場の汚染の減衰対策、場の密度の対策、エージェントの汚染防御、エージェントの汚染の減衰対策、身体的な条件によるエージェントの感染抑制の六つの次元に分けてモデル化している。

第三の人間活動モジュールは、人間の社会的活動モデルに関するもので、都市モデルや病院、学校等の組織のモデル等であり、その上で様々な年齢・性別・職業等のデモグラフィック属性を持った主体が、移動と接触を伴う社会的な活動を行うモデルである。感染したエージェントはこの人間活動モジュールが与える人工社会の上で、ウィルスや細菌等を排出し、場を汚染させ、それにより他のエージェントが汚染され、感染するというプロセスを辿る。ここでは、エージェントの行動に対する隔離や入院、学校や事業所に対する学級閉鎖や事業所閉鎖等や道路封鎖、交通対策などのエージェントの行動制約が対策の次元に付け加わる。

なお本報告では、病態モジュールと感染モジュールの構造を中心に報告する。

2 病態モジュールと感染モジュールの構造

2.1 病態モジュール

病態モジュールは、感染症の病態をステージで表現し、その遷移確率をモデル化したものである。0が未感染、0iが回復して免疫を獲得した状態を意味する。病態のステージをモデル化する前提として、エージェントの年齢をb:baby, c:child, y:young, m:middle, o:oldの5つのカテゴリーに区分した。

それ以外の病態のステージは感染症毎に異なる。我々はここで鳥インフルエンザで想定される病態モデルをステージ0から、1,2,2m,3,3m,3s,3p,4c,4m,5,D,0iと次のように区分する。

Table 1 Disease Stage Model

Stage	Explanation	Period	Excretion	Scale
0i	Recovery with immunity		No	0
1	First Stage	2 days	little	0.2
2	Second Stage: high fever	2 days	large	0.6
2m	Second Mild Stage: slight fever	2 days	little+	0.4
3	Third Stage: feaver	2 days	large+	0.8
3m	Third Mild Stage: slight feaver	1 day	medium	0.5
3s	Third Severe Stage	3 days	large	0.6
3p	Third Pneumonia Stage	3 days	large	0.6
4c	Fourth Critical Stage	3 days	medium	0.5
4m	Fourth Mild Stage	3 days	medium	0.5
5	Fifth Recovery Stage	2 days	little	0.2
D	Death		No	0

病態のステージ間の遷移は、次のテーブルのようにモデル化される。これは、年齢とインフルエンザのワクチン投与、老人に対しては肺炎球菌(*Streptococcus pneumoniae*)のワクチン投与の有無とタミフル投与による治療の有無(Treatment)で区分して、病態のステージ間の遷移確率を記したテーブルとなっている。

ここでの最終的な死亡率などは、鳥インフルエンザの人型変異で想定されている数値になるようにフィッティングしてある。対策としては、インフルエンザワクチン、更にold ageに対しては、肺炎球菌ワクチンの投与を想定している。また罹患した患者に対してはタミフル投与を対策として想定している。

Table 2 Stage Transition Model

Age	Infl. Vacc.	Pres. Vacc.	Disease Stage	Tran. Prob.	Disease Stage	Treat	Tran. Prob.	Disease Stage	Tran. Prob.	Disease Stage	Tran. Prob.	Disease Stage	tran. prob.	Disease Stage	Day	prob.	Prob. Sum.
b,y,c,m	No	No	1	0.8	2	-	0.8	3	-	5	1	0i	-	-	8	0.64	-
b,y,c,m	No	No	1	0.8	2	-	0.2	3s	0.8	4m	1	5	1	0i	12	0.128	-
b,y,c,m	No	No	1	0.8	2	-	0.2	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.032	0.8
b,y,c,m	No	No	1	0.8	2	Treat	0.5	3m	-	5	1	0i	-	-	7	0.4	-
b,y,c,m	No	No	1	0.8	2	Treat	0.4	3	-	5	1	0i	-	-	8	0.32	-
b,y,c,m	No	No	1	0.8	2	Treat	0.1	3s	0.8	4m	1	5	1	0i	12	0.064	-
b,y,c,m	No	No	1	0.8	2	Treat	0.1	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.016	0.8
b,y,c,m	No	No	1	0.2	2m	-	1	3m	-	5	1	0i	-	-	7	0.2	0.2
o	No	No	1	0.9	2	-	0.6	3	-	5	1	0i	-	-	8	0.54	-
o	No	No	1	0.9	2	-	0.4	3s	0.9	4m	1	5	1	0i	12	0.288	-
o	No	No	1	0.9	2	-	0.4	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.072	0.9
o	No	No	1	0.9	2	Treat	0.4	3m	-	5	1	0i	-	-	7	0.36	-
o	No	No	1	0.9	2	Treat	0.4	3	-	5	1	0i	-	-	8	0.36	-
o	No	No	1	0.9	2	Treat	0.2	3s	0.8	4m	1	5	1	0i	12	0.144	-
o	No	No	1	0.9	2	Treat	0.2	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.036	0.9
o	No	No	1	0.1	2m	-	1	3m	-	5	1	0i	-	-	7	0.1	0.1
b,y,c,m	Yes	No	1	0.5	2	-	0.8	3	-	5	1	0i	-	-	8	0.4	-
b,y,c,m	Yes	No	1	0.5	2	-	0.2	3s	0.8	4m	1	5	1	0i	12	0.08	-
b,y,c,m	Yes	No	1	0.5	2	-	0.2	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.02	0.5
b,y,c,m	Yes	No	1	0.5	2	Treat	0.5	3m	-	5	1	0i	-	-	7	0.25	-
b,y,c,m	Yes	No	1	0.5	2	Treat	0.4	3	-	5	1	0i	-	-	8	0.2	-
b,y,c,m	Yes	No	1	0.5	2	Treat	0.1	3s	0.8	4m	1	5	1	0i	12	0.04	-
b,y,c,m	Yes	No	1	0.5	2	Treat	0.1	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.01	0.5
b,y,c,m	Yes	No	1	0.5	2m	-	1	3m	-	5	1	0i	-	-	7	0.5	0.5
o	Yes	No	1	0.5	2	-	0.6	3	1	5	1	0i	-	-	8	0.3	-
o	Yes	No	1	0.5	2	-	0.4	3s	0.8	4m	1	5	1	0i	12	0.16	-
o	Yes	No	1	0.5	2	-	0.4	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.04	0.5
o	Yes	No	1	0.5	2	Treat	0.4	3m	1	5	1	0i	-	-	7	0.2	-
o	Yes	No	1	0.5	2	Treat	0.4	3	1	5	1	0i	-	-	8	0.2	-
o	Yes	No	1	0.5	2	Treat	0.2	3s	0.8	4m	1	5	1	0i	12	0.08	-
o	Yes	No	1	0.5	2	Treat	0.2	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.02	0.5
o	Yes	No	1	0.5	2m	-	1	3m	1	5	1	0i	-	-	7	0.5	0.5
o	No	Yes	1	0.9	2	-	0.8	3	1	5	1	0i	-	-	8	0.72	-
o	No	Yes	1	0.9	2	-	0.2	3s	0.8	4m	1	5	1	0i	12	0.144	-
o	No	Yes	1	0.9	2	-	0.2	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.036	0.9
o	No	Yes	1	0.9	2	Treat	0.7	3m	1	5	1	0i	-	-	7	0.63	-
o	No	Yes	1	0.9	2	Treat	0.2	3	1	5	1	0i	-	-	8	0.18	-
o	No	Yes	1	0.9	2	Treat	0.1	3s	0.8	4m	1	5	1	0i	12	0.072	-
o	No	Yes	1	0.9	2	Treat	0.1	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.018	0.9
o	No	Yes	1	0.1	2m	-	1	3m	1	5	1	0i	-	-	7	0.1	0.1
o	Yes	Yes	1	0.5	2	-	0.8	3	1	5	1	0i	-	-	8	0.4	-
o	Yes	Yes	1	0.5	2	-	0.2	3s	0.8	4m	1	5	1	0i	12	0.08	-
o	Yes	Yes	1	0.5	2	-	0.2	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.02	0.5
o	Yes	Yes	1	0.5	2	Treat	0.7	3m	1	5	1	0i	-	-	7	0.35	-
o	Yes	Yes	1	0.5	2	Treat	0.2	3	1	5	1	0i	-	-	8	0.1	-
o	Yes	Yes	1	0.5	2	Treat	0.1	3s	0.8	4m	1	5	1	0i	12	0.04	-
o	Yes	Yes	1	0.5	2	Treat	0.1	3s	0.2	4c	1	0	-	-	10	0.01	0.5
o	Yes	Yes	1	0.5	2m	-	1	3m	1	5	1	0i	-	-	7	0.5	0.5

2.2 感染モジュール

(1) 排出とその抑制

感染モジュールでは、病態のステージに応じて菌体やウィルスの排出をスケール化する。テストモデルでの排出スケールは表1の右に示されている。これに対して、エージェントはマスクの着用等で排出をフィルタリングして押さえることができる。これを排出抑制フィルター

(EPF: 0-1: Excretion Protection Filter)として0-1でスケール化する。1が素通しで0が排出の完全抑制を意味する。これによりエージェントの危険度を示すエージェントハザードレベル(AHL [i]: Agent Hazard Level of Agent i)が、 $AHL[i](t) = AES[i](t) * EPF[i]$ として計算される。これらの関係は、下図1で示される。

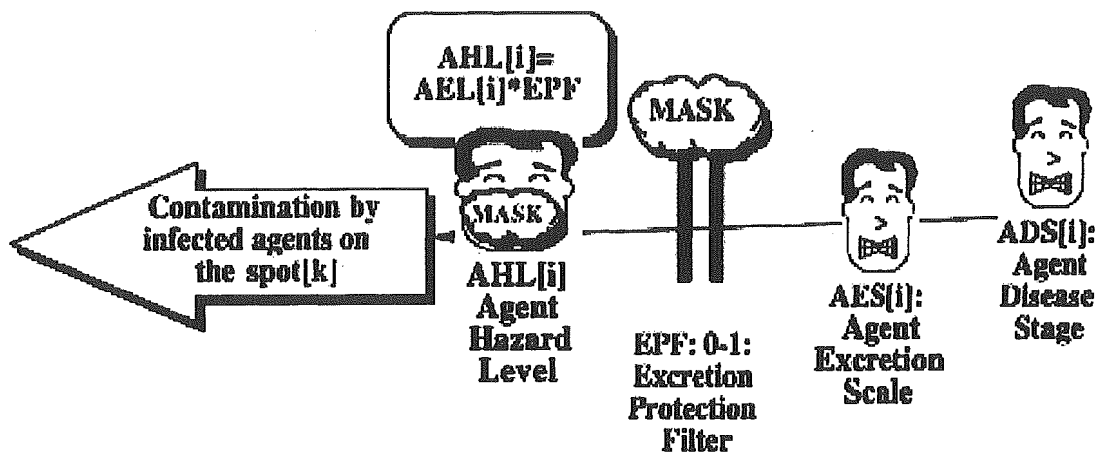


Figure 1 Excretion and Its Protection

(2) 場（スポット）の汚染とその減衰対策

場の汚染は、以前の汚染の減衰の結果としての現在のステップでの初期汚染に、その場にいる菌体やウィルスを排出するエージェントによる汚染が加わって決定される。場にいるエージェントによる汚染は、エージェントによるそのスポットkでのハザードレベル $AHL[k] = \sum \{AHL[i] \mid i \in \text{Spot}[k]\}$ によって決定される。スポットkの汚染度SCL (Spot Contamination Level)は、 $SCL[k](t) = AHL(t) + SCL[k](t-1) * \text{SpotAF}[k]$ によって決定される。 $\text{SpotAF}[k]$ はスポットkの以前の汚染の減衰を表すフィルターである。このフィルターは、湿度や気温等の環境要

因によるウィルス、菌体の減衰と、消毒による減衰から決定される。環境要因によるフィルター(Environment Spot Attenuation Filter)は、 $\text{EnSAF}[k](t-1)$ で示され0-1の範囲を取る。これは自然によっても支配されるが、加湿対策としてコントロールすることも可能である。同様に消毒によるフィルター(Sterilization Spot Attenuation Filter)は $\text{StSAF}[k](t-1)$ で記され、0-1の値を取る。結局スポットの減衰フィルター(Spot Attenuation Filter)は、 $\text{SpotAF}[k] = \text{EnSAF}[k] * \text{StSAF}[k]$ で示される。

これらの関係は図2に示される。

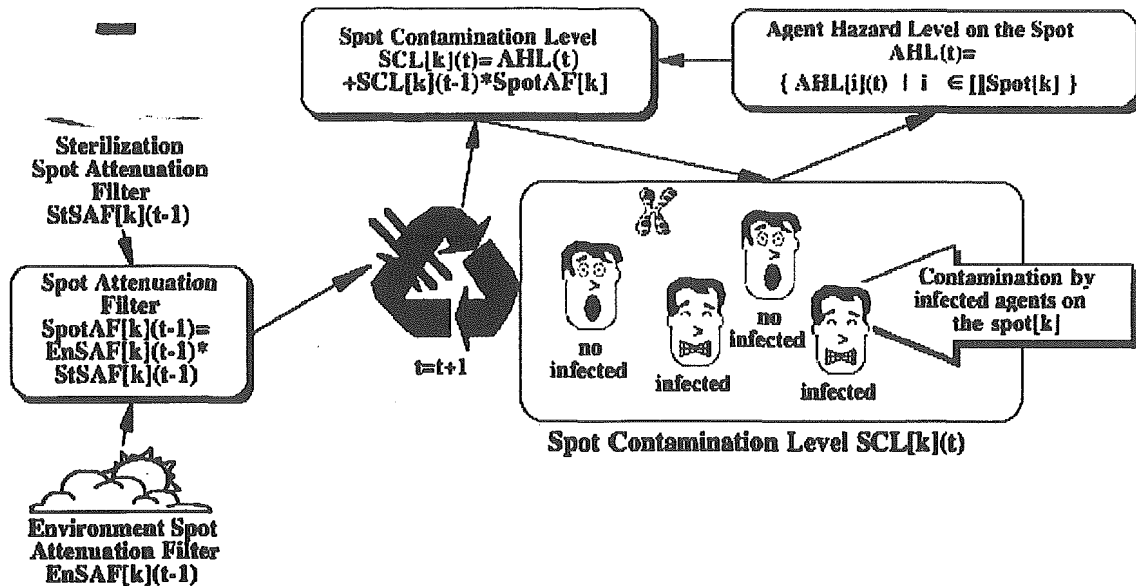


Figure 2 Spot Contamination and Its Attenuation

(3) 場（スポット）の密度管理とエージェントの汚染防止対策

場の汚染は、結果としてエージェントの汚染を引き起こす。ここではエージェントは相互にダイレクトに感染すると想定せず、モデル上は場の汚染、更に場の汚染からエージェントの汚染を経由して感染すると想定している。この想定は感染のプロセスの一般性を制限するものとはならない。スポットの汚染レベルからエージェントの汚染が決定されるプロセスでは、二つの要因がこれをコントロールすることができる。第一の要因は、場の密度である。物理的に同じ密度の空間であってもエージェントの行動形態等によって実際のエージェントの接触頻度は異なってくる。例えばオフィスの労働者と教室の子供では接触頻度は子供の方が高いだろう。また家族では家族の文化的な形態によりその接触頻度は異なるだろう。これらを表現するには、詳細な行動モデルを秒単位で構成することが必要となり、現実的ではない。そこで我々は、バーチャル密度というパラメータをその場での接触密度を表現するパラメータとして導入する。この

バーチャル密度は感染（汚染）防止対策としても重要である。行動形態を変えることや、場そのものの物理的なエージェント密度を変化させることで、バーチャル密度は調整される。これは例えば病院のベッドや事務所、教室の机の距離配置、更に電車の時差通勤対策等多様な場でコントロール可能な変数となる。エージェントの汚染を決定する第二の要因は、エージェントの側のプロテクト対策である。N95マスクは、エージェントの気道汚染を効果的に防止するフィルターとなる。また状況や感染症によっては、手術室の手袋や眼鏡もこの種のフィルターとなる。

バーチャル密度(Virtual Density)は、バーチャル空間サイズ(Virtual Space Size:VSS[k])の逆数として、Virtual Density:VD[k]=1/VSS[k]で与えられる。これに対して、スポットの汚染度SCL[k]から密度リスク、DRSCL[k]:Density Risk by SCLがDRSCL[k](t)=SCL[k](t)*VD[k]として決定される。

またエージェント[i]のプロテクト対策はフィルターとして、Agent

Contamination Protection Filter:ACPFで表される。防止対策をした後の、エージェント[i]にとっての場[k]のハザードレベルは、Spot Hazard Level After

Protectionとして、 $SHLAP[k,i]=DRSCL[k](t)*ACPF[i]$ で表される。これらの関係は、図3に示される。

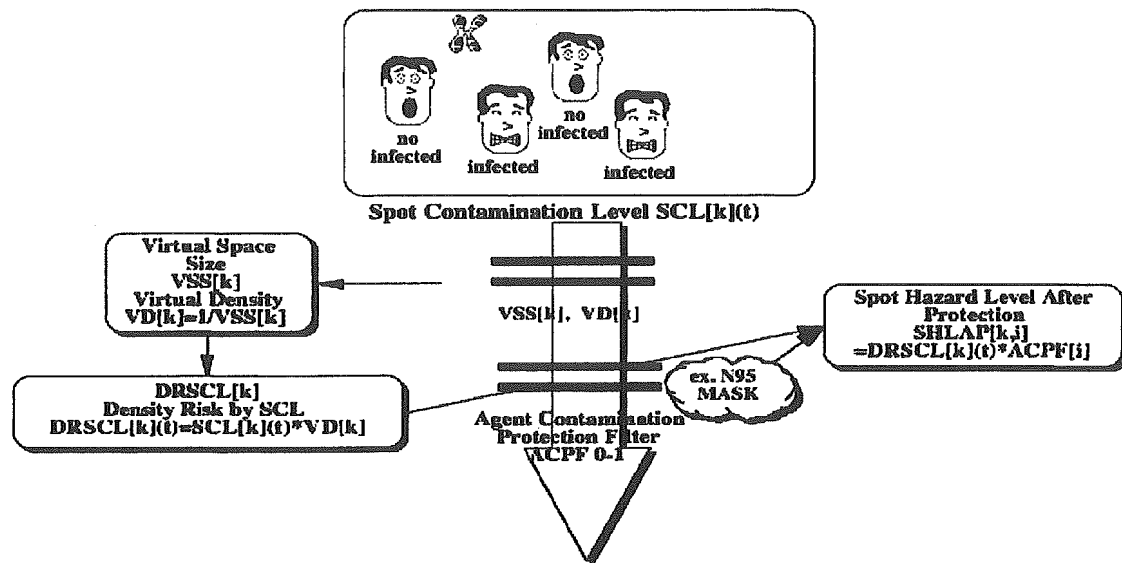


Figure 3 Virtual Density Control and Protection of Agent Contamination

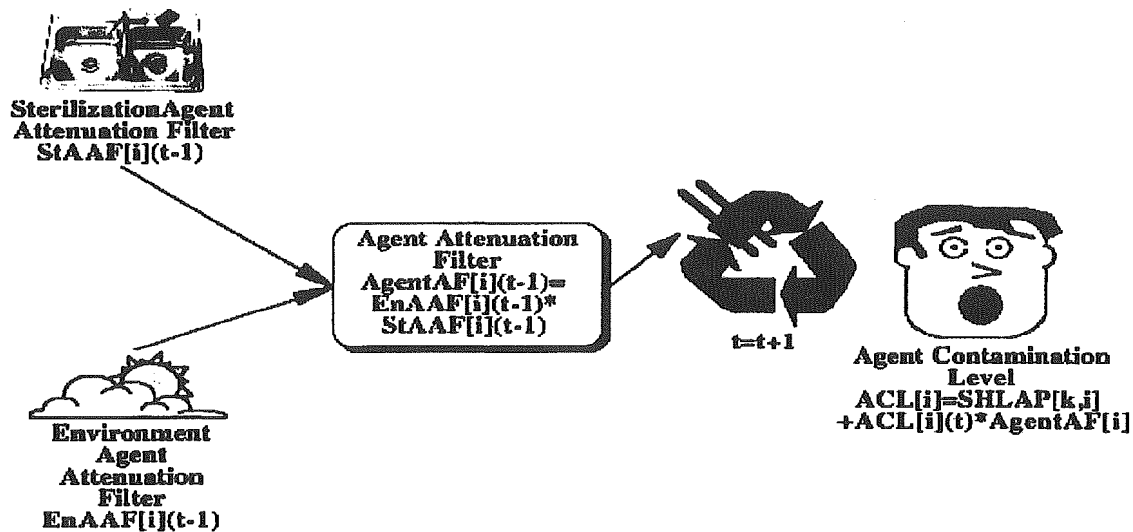


Figure 4 Agent Contamination and Its Attenuation

(4) エージェントの汚染とその減衰対策

エージェント[i]の汚染度(Agent Contamination Level)は、エージェント[i]にとっての場[k]のハザードレベル $SHLAP[k,i]$ から、 $ACL[i](t)=SHLAP[k,i](t)+ACL[i](t-1)*AgentAF[i](t-1)$ で与えられる。

場の汚染の場合と同様に、前期の汚染の減衰は、湿度や気温等の環境要因によるウィルス、菌体の減衰フィルター (Environment Agent Attenuation Filter $EnAAF[i]$) と、消毒やうがい、手洗いなどの対策による減衰フィルター (Sterilization Agent Attenuation Filter $StAAF[i]$) から Agent Attenuation Filter $AgentAF[i]=EnAAF[i]*StAAF[i]$ として決

定される。これらは図4に示される。

(5) エージェントの感染とその対策

エージェントの感染は、エージェントの汚染と、エージェントのワクチネーション等による抗体値などの体調によって、確率的に決定される。当該の期（ステップ）にエージェントが感染する確率（0-1）、 $P(\text{infection of agent } [i] \text{ per Step})$ は、

$$P(\text{infection of agent } [i] \text{ per Step}) = 1 - \exp(-FP * TP * ACL[i])$$

で決定される。ここでTPはTick Parameterと呼ばれ、モデルの時間間隔を変えた時に調整するパラメータである。これに対して、FP(Fitting Parameter)はワクチンの感染防止効果等をフィッティングさせるためのパラメータである。結果としてエージェントはある確率で感染し、ステージ1から病態の変化がスタートする。これらの関係は図5に示される。

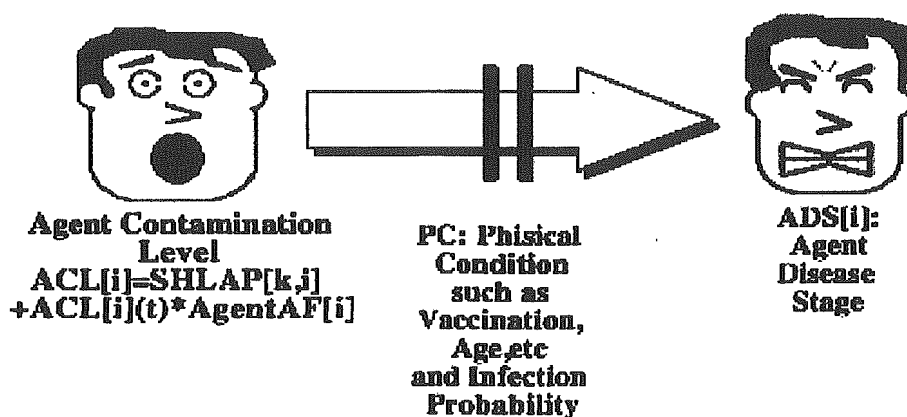


Figure 5 Agent Infection Probability

2.3 人間活動モジュール

我々は現在、病態モデルと感染モデルをのせることのできる、人間活動モジュールとして都市や病院の詳細モデル等何種類かの社会シミュレーション枠組みをSOARSで開発中である。これらのモジュールの統合は現在試験を開始したばかりである。

ここでは簡単な都市モジュールの構造

を説明する。都市モジュールは、図6のような構造を持つ。

このモジュールは鉄道で結ばれた住宅・商業・工業・農業地区の4地区9エリアからなり、各地域には、家・店・会社・学校・病院が配置される。

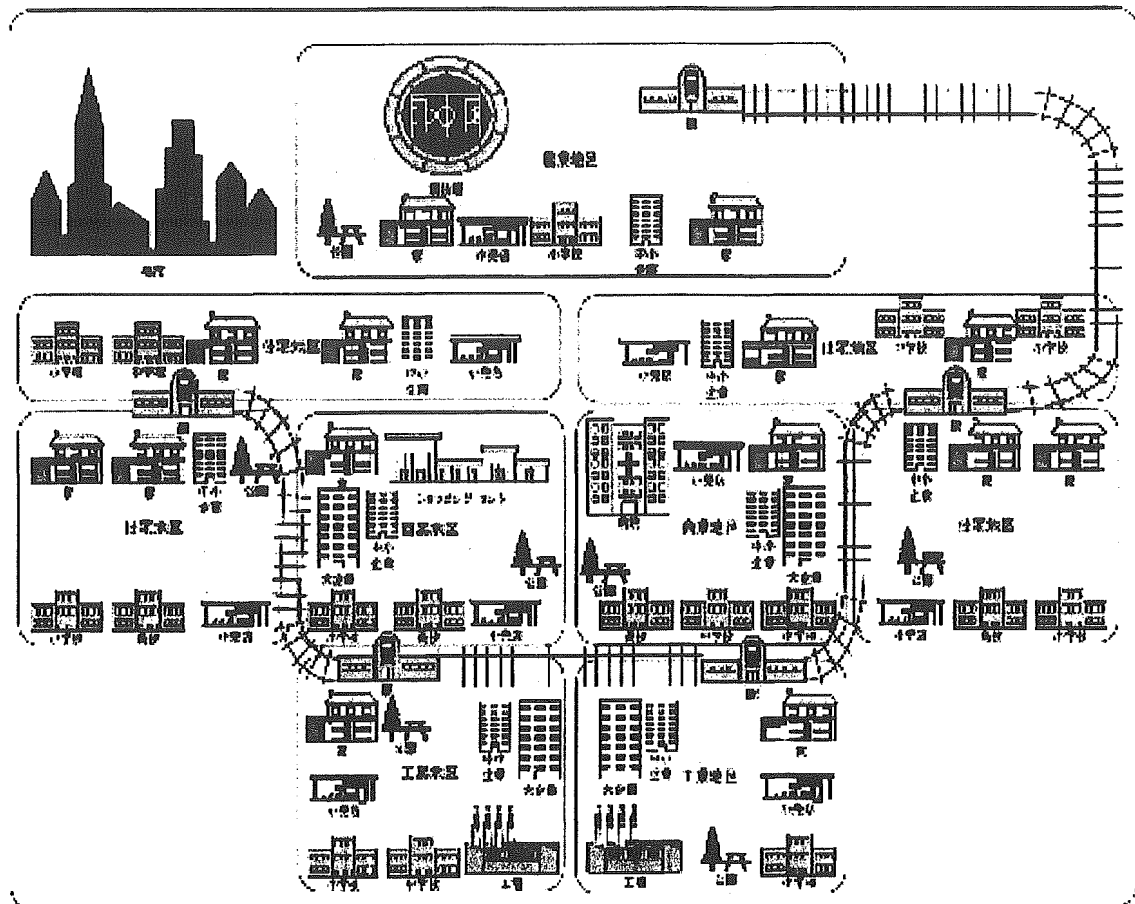


図6 都市モジュールの基本モデル

総人口は24685名、総世帯数9500世帯で、成人男性6725名、成人女性7125名、老人男性1585名、老人女性1735名、子供7515名の中堅都市をモデル化している。エージェントの基本行動は、年齢により異なり、次のように組み込まれている行動を毎日繰り返す。

- 1.成人男性役割：家→仕事→寄り道→家
- 2.成人女性役割：家→買い物→家、家→仕事→寄り道→家
- 3.子供役割：家→学校→塾or家にStay
- 4.老人男性と老人女性：家→外出（店・レストラン）→家

都市モジュールでは、この行動パターンを変化させることで様々な活動規制を対策として分析することができる。

D. 考察

3 対策のプログラム&プロジェクトマネジメント

感染症のシミュレーションを社会の共有する内部モデルとして、対策のための制度設計と対策の実施問題を計画、実行するためには、シミュレーション結果を利用して対策のプログラムと個別のプロジェクトを策定し、実行するための枠組みが必要となる。

ここでは、P2M(Program and Project management)の枠組みを用いてこの問題を分析する。大規模感染症に関するステークホルダーは多岐にわたる。これらのステークホルダーの対策の実行はそれほど容易ではない。感染症に対する対策の立法措置や組織による対策の実施には

多くの場合、時間遅れが決定的に影響する。我々はモデルをプログラムから、プロジェクトへブレイクダウンして個別の実行計画を検討するにあたって、我々のモデルで新たに提起された概念をベースに、プログラムを策定し、その評価を行う枠組みに付いて分岐したい。

我々の感染モジュールでは、感染対策は次の六種類に特徴付けられた。

- 1) 排出抑制政策
- 2) スポット（場）の汚染の減衰対策
- 3) バーチャルスペースサイズ（空間密度）の管理対策
- 4) エージェントの汚染のプロテクション対策
- 5) エージェントの汚染の減衰対策
- 6) 身体的条件による感染確率抑制対策

第一の対策は、マスクによる環境への菌やウィルスの排出を抑制することを基本とするもので、その実施のためには、排出抑制のためのマスクの着用の慣習の普及と、マスクの供給方法のプロジェクトが組まれる必要がある。これには、例えばティッシュの無料配付のような形で単価の安いマスクを企業に宣伝と社会貢献として駅や盛り場で配付してもらうなどのプロジェクトが検討される必要がある。第二の対策は、汚染された場の汚染を次のステップまでに減衰

（除去）するための対策で、湿度などの環境要因によるものと、消毒によるものにわけられる。例えばタクシーのような乗り物では、乗客毎の消毒対策は有効に機能するだろう。これに対して空間密度の管理対策は、事業所や学校での机の配置やフレックスタイム、交通での時差通勤などを通じて、人間の空間密度、接触密度を小さくする対策となる。これは社会対策として、今後我々の

モデルの中で様々な評価される予定である。

個々の汚染のプロテクト対策は、N95マスクの着用で代表されるものだが、これについても現状では社会的に十分な対策がなされていない。病院の一部に設置されているN95マスクの自動販売機が、駅や盛り場等に設置するといったプロジェクトが検討される必要がある。

これら各々のフィルターに対する対策は、表3のようにまとめられる。

具体的な対策を実施するには、コストとその評価の視点が欠かせない。我々はシミュレーション分析の中で、コストと有効性評価のための基本枠組みをモデル化した。個々の対策はその組み合わせでコストが評価され、シミュレーションの結果としての対策の効果と併せて、指標化され、結果として対策のコスト効果が評価される。表4はそのプロセスを仮想のデータで例示的に示したものである。

4.E. 結論

本研究では、また多様な社会対策をモデルに組み込んでその評価を行えるようにした点に特色がある。従来の感染症研究では、理論面からのパーコレーションやコンタクトプロセスの数理解析、都市やコミュニティ、組織の中での人間の活動プロセスの社会シミュレーション、更に疫学的知見や病態に対する医学的モデルや感染モデルという異なったレベルのモデルを統合して全体としての対策のプログラムを統合的に検討することは非常に困難であった。

本研究では社会シミュレーションを基盤に起きつつ、そこでのモデルを、病態モジュール、感染モジュール、人間活動モジュールと分割した。

表3 フィルタ毎の対策と対策主体

フィルタ	対象区分	対策名	対象群組	対策主体	対策具体策	モデルパラメータ
環境型減衰	スポット	湿度温度対策	事業所	事業主	加湿器	EnSTF[事業所]
環境型減衰	スポット	湿度温度対策	学校	事業主	加湿器	EnSTF[学校]
環境型減衰	スポット	湿度温度対策	病院	事業主	加湿器	EnSTF[病院]
消毒型減衰	スポット	消毒対策	事業所	事業主	定時消毒	StSAF[事業所]
消毒型減衰	スポット	消毒対策	学校	学校/文部科学省	定時消毒	StSAF[学校]
消毒型減衰	スポット	消毒対策	病院	病院/厚生労働省	定時消毒	StSAF[病院]
消毒型減衰	スポット	消毒対策	タクシー	事業主	客毎に消毒	StSAF[タクシー]
空間密度	スポット	密度管理対策	事業所	事業主	机等の空間配置	VD[事業所]
空間密度	スポット	密度管理対策	家庭	家庭	寝具・行動変容等	VD[家庭]
空間密度	スポット	密度管理対策	学校	学校/文部科学省	机等の空間配置/行動変容	VD[学校]
空間密度	スポット	密度管理対策	病院	病院/厚生労働省	ベッドの空間配置等	VD[病院]
空間密度	スポット	密度管理対策	電車	事業主/国土交通省	時差通勤・改札管理	VD[電車]
排出抑制	エージェント	排出抑制対策	個人	個人/事業者等	マスクの街頭宣伝配布等	EPF
汚染防衛	エージェント	汚染防衛対策	個人	個人/事業者等	N95マスクの自販機設置	ACPF
環境型減衰	エージェント	湿度温度対策	個人	個人	保湿等	EnAAF
消毒型減衰	エージェント	消毒対策	個人	個人	うがい・手洗い	StAAF
感染確率抑制	エージェント	感染確率対策	個人	個人/厚生労働省等	ワクチン接種等	PC

表4 対策の比較分析のためのモデル枠組み

対策種類	定数	対策コスト	対策型1	対策型2	対策型3	コスト例
対策1	k1	cost(1)	1	1	0	5000
対策2	k2	cost(2)	0	1	1	10000
...	...	...	0	1	0	3000
対策m	km	cost(m)	1	1	0	2000
総人口	Pop		25000	25000	25000	設定
無対策感染者	B_infec		6250	6250	6250	Sim例
無対策死者	B_death		125	125	125	Sim例
無対策感染比率	B_infec/Pop		0.25	0.25	0.25	計算
無対策死亡率	B_death/B_infec		0.02	0.02	0.02	計算
対策感染者数	M_infec	小さい方がよい	3000	4000	5000	Sim例
対策死者数	M_death	小さい方がよい	30	20	40	Sim例
対策感染比率	M_infec/Pop	小さい方がよい	0.12	0.16	0.2	計算
対策後死亡率	M_death/M_infec	小さい方がよい	0.01	0.005	0.008	計算
対策感染減少数	B_infec-M_infec	多い方がよい	3250	2250	1250	計算
対策死者減少数	B_death-M_death	多い方がよい	95	105	85	計算
対策感染減少率	対策感染減少数/B_infec	大きい方がよい	0.52	0.36	0.2	計算
対策死亡減少率	対策死者減少数/B_death	大きい方がよい	0.76	0.84	0.68	計算
コスト	Tcost		7000	20000	10000	計算
感染減少コスト/人	Tcost/対策感染減少数	小さい方がよい	2.15385	8.889	8	計算
死亡減少コスト/人	Tcost/対策死者減少数	小さい方がよい	73.6842	190.5	117.6	計算
感染減少効果/コスト	対策感染減少率*1000/コスト	大きい方がよい	0.07429	0.018	0.02	計算
死者減少効果/コスト	対策死者減少率*1000/コスト	大きい方がよい	0.10857	0.042	0.068	計算
絶対死者数評価	A-C		B	A	C	計算
死亡減少コスト/人・評価	A-C		A	C	B	計算
死者減少効果/コスト・評価	A-C		A	C	B	計算
コスト計算式	$Tcost = \sum \{cost(i) \times use(i) \mid i \in \text{対策インデックス}\}$, use(i)は採用は1,未採用0					

大規模感染症に対する対策を三つのモジュールの中で構造化したことで、各々の対策はそれぞれより詳細なモデルにブレークダウンできるようになった。この防疫対策のシミュレーション

に我々の開発したSOARSを用いることで、従来の感染症モデルにない一般性と大規模性を備えたモデルの開発が可能となった。

本研究では、設計開発した三つのモジュールをSOARS上で実装を開始して、その評価テストをはじめたところである。今後具体的な問題状況で、モデルを構成する基本モジュール群のフィッティングテストを行い、パラメータを調整しモデル全体の妥当性を検証した後に、具体的対策の分析へと移る予定である。一定の成果が得られた段階で、シミュレーションモデルを公開し、大規模感染症対策に関連したステークホルダーがドメインエキスパートとしてモデルを自由に改変して当該の状況にあったものを開発できるようにする予定である。

さらにこのシミュレーションモデルに対応する形で、感染の拡散と収束のスポット上でのコンタクトをベースとした動学モデルを、コンタクトネットワークダイナミクスとして定式化し、その臨界指数を求めるなどの理論的研究も併せて行っていく予定である。

従来、インフルエンザの疫学では、気温と湿度に流行が大きな影響を与えることは論じられてきたが、それを陽にモデルに組み込むことは難しかった。また沖縄でインフルエンザの流行の終わる時期が遅いこと、2005年の夏に小流行が起きたこと、熱帯で高温多湿だがインフルエンザが流行することなどは、従来の疫学では十分に理論化されているとは言えなかった。我々はここでバーチャル密度の概念を導入し、エージェントのコンタクト密度を数秒単位のモデルで解析することなくモデルに組み込むための工夫を行った。この視点から見ると、家族行動のパターンの差がバーチャル密度に強く影響することは容易に想像できる。そのことが沖縄や熱帯でのインフルエンザ感染に大きな要因となっているのではないかというのがこのモデルからの

一つのコンジェクチャーである。また交通対策等でも、バーチャル密度の対策としてこれを捉えることで、時差通勤や積極的な車内密度の管理対策を導入し、それにより交通遮断に代替する効果を得られるかを検討する可能性がでてくる。この他にも学校や事業所での机の配置等で実現できるバーチャル密度対策は社会対策として大きな意味を持つ可能性がある。これらはいずれも今後の検証を必要とするところであるが、空間密度以外の対策に関しても同様に新たなリサーチプログラムの方向性を打ち出すことが可能となる。

我々は大規模感染症に対する疫学的対策を、医療のみならず社会システムの問題として捉えることで総合的に効果のある対策を社会にインプリメントするための枠組みを分析していきたい。それは世界規模で生じるであろうパンデミックに各国の事情に併せた対策をデザインするためにも必須となる。我々は現在インドネシアのバンドン工大と共同プロジェクトを開始する準備をしている。

G. 研究発表

1. 論文発表 なし
2. 学会発表 予定

出口弘、金谷泰宏、兼田敏之、小山祐介、市川学、田沼英樹、社会シミュレーションに基づいた大規模感染症防止対策のプログラム&プロジェクトマネジメント、国際プロジェクト&プログラムマネジメント学会春季大会論文集、2006,5月12-13,日本工業大学

研究要旨 生物テロとその対策のシミュレーションをする上で、人を媒介とした感染伝播をモデル化することが必須である。その基礎データとして、人同士の接触がどのように発生しているかを実データに基づいて解析し、感染伝播ネットワークを構築した。さらに、得られたネットワークを社会ネットワーク的視点から分析した結果、スモールワールド性があり、次数において強い正の相関を持つことが判明した。

A. 研究目的

生物テロの対策手法を研究する上で、どのようにして人同士が、社会的関係の中で接触関係を持ち、それを契機として感染が伝播していくのかを予測することは重要であるにもかかわらず、モデル化が困難であるため、従来は社会的関係の多様性を直接的に扱わずにモデル化が行われた上で様々な議論がなされてきた。しかしながら、社会的関係の中で、人同士がどのような接触関係を持つのかに関しては、社会ネットワークの分野でも議論があり、そのモデル化は容易ではない。本研究課題の主眼は、実用に供することができるようなモデルを提案することであり、その上で社会ネットワークを、以前議論の多い単純なモデル化によって規定してしまうのは問題がある。そこで、本分担研究においては、鉄道による人の移動の実データ（国土交通省「大都市交通センサス」）を用いて分析し、その構造をネットワーク的な視点から解析する。解析結果は別の分担課題においてエージェントベースのシミュレーションを行うために、次年度以降使用されることになる。

B. 研究方法

国土交通省では5年ごとに大都市交通センサスを実施することで首都圏、中京圏、近畿圏の三大都市圏について、大量公共交通機関の利用実態を把握している。今回は最新の大都市交通センサス（平成12年実施）において提供されるデータの中から、首都圏において、特に定期券利用者を対象としてサンプリングされた各々の乗客に関する全乗車経路における乗車時刻と降車時刻と、利用した経路の情報をを用いることとした。

乗客は乗車駅から降車駅の間に複数の駅を通過するが、各々の乗客の乗車時刻と降車時刻から途中経由する各々の駅の通過する時刻を推定することで、

同じ時間帯（前後3分未満）に同じ区間に存在していた乗客の組を選別する。さらに、そのような組の中から、乗車車両の相違による伝播の有無を模倣するために、乗客は均等な確率で10両ある車両のいずれかに乗車していると仮定した。ここでは、同一時刻に同一区間で同一車両に共存した乗客の間に、近接関係があったと定義した。

以上の関係に関与する全ての乗客をノードとし、近接関係をエッジとして構成された無向グラフを分析の対象とし、その特徴をネットワーク指標等を用いて分析する。伝染病の社会的接触によるネットワーク上での伝播を研究した既存の文献における結果（Eubank et al., (2004)など）と比較するため、次数の平均、次数相関係数、平均クラスターリング係数、ノード削除による最大連結成分規模の推移等を観測した。

C. 研究結果

大都市交通センサスデータにおいて4時から12時までの間に出発駅を発車した乗客は8,105,745名であり、全調査対象者の98%を占めていた。この中で、5区間以上を移動する間継続的に近接関係を維持した乗客同士のみを考慮してネットワークを構築すると171,485名の乗客の間に1,310,292件の関係性が構築された。

次数の平均(mean of degree)は15.3であり、次数相関係数(degree correlation)は0.57、平均クラスターリング係数(mean of clustering coefficients)は0.46であった。次数の分布を図1に示す。また概ね98%が最大連結成分に属し、次数が高い順にノードを削除していくと次数20以上のノードを削除しても全ノードの半数以上が最大連結成分に属した。ノードの削除による最大連結成分の規模の変化を図2に示す

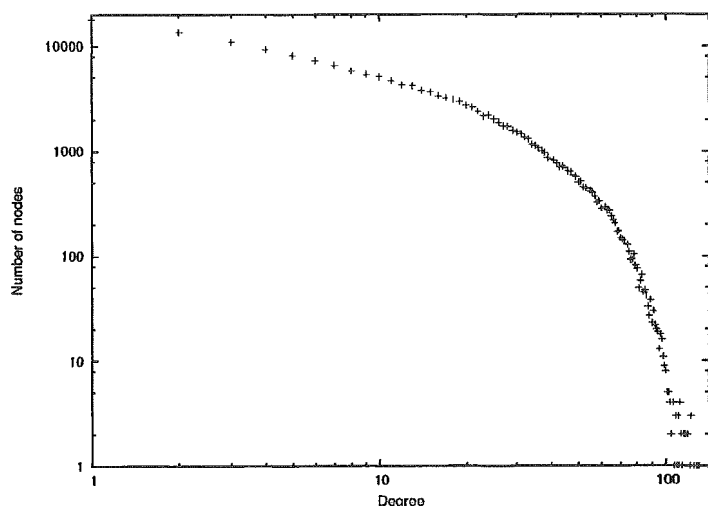
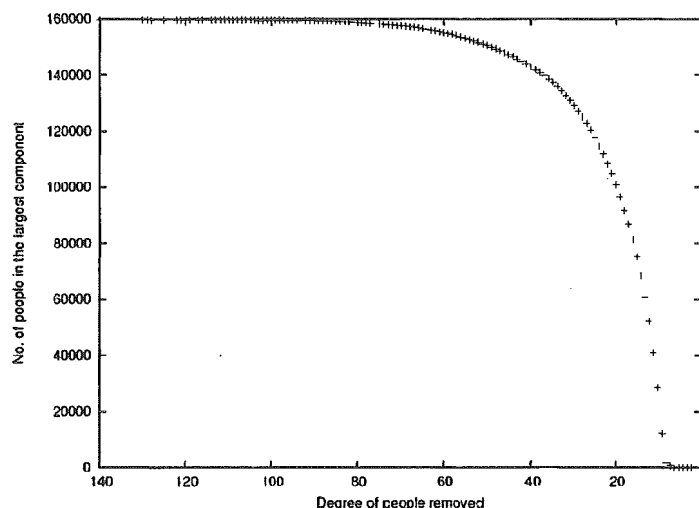


図1. 近接関係ネットワークにおける
ノードの次数の分布

れた情報に対して、より詳細な分析を適用することで、そのネットワーク的特徴を明らかにしていくべ



きであることが認識された。

F. 健康危機情報

本分担課題では健康機器に関する情報は扱っていない。

図2. 次数が高いノードから順次削除していった際の
最大連結成分の規模の変化

D. 考察

比較対象とした Eubank らによる研究では、ポートランド市街における社会的接触関係をシミュレーションによって高精度で推測しているが、そこで得られている結果と本研究で得られた結果は多くの面で類似性がある。これは、モデル化において使用した社会的接触のメカニズムの違い (Eubank らは自動車等による移動と社会活動による近接関係であるのに対して、本研究では通勤における電車の使用による近接関係のみを扱った) を考慮すると興味深い。

平均クラスター係数は同規模のエルデシュのランダムグラムに比べてきわめて高く、高いスモールワールド性が期待される。また、強い正の次数相関があることからネットワークのレジリエント性が高いと期待される。そのことは次数の高いノードから削除していった際の最大連結成分の変化によって確認された。

E. 結論

社会的接触関係のモデル化を行う場合に、大都市交通センサスデータを用いることの有効性と、用いたモデル化の有用性が確認されたため、今後は得ら

G. 研究発表

1. 論文発表

特にない

2. 学会発表

特にない

H. 知的財産権の出願・登録状況

(予定も含む)

1. 特許取得

特にない

2. 実用新案登録

特にない

3. その他

参考文献

Eubank, S. et. al. (2004) Modelling disease outbreaks in realistic urban social networks. *Nature*, 429, 180-184.

保健所におけるバイオテロリズム及び一類感染症対策の現状と課題

分担研究者 内山巖雄 京都大学大学院工学研究科 教授
村山留美子 京都大学大学院工学研究科 助手
研究協力者 安川良朗 同志社大学 教授
榎谷清太 京都大学大学院工学研究科 修士課程

研究要旨：本研究では、自治体における生物テロ及び一類感染症対策の中でも主として天然痘テロ及び SARS 対策の実施状況について、地域レベルで中心となって対応する保健所を対象にアンケート調査を実施し、現状の把握を試みた。回答のあった 285 の保健所のうち、天然痘対応マニュアルを整備している保健所は 74 %とやや低く、整備状況に差があることが認められた。また、厚生労働省が定めた 6 つの実働班について、対応指針に記載されている必要な人員は 6 つの実働班それぞれについて決まっていない保健所は 4 割程度存在し、その管轄区域で天然痘テロが発生した場合には必要な人員が確保されない可能性があることが示唆された。また、実働班数の分布は、6 つの実働班全てについて決められている保健所は 55 %であるのに対して、全く決まっていない保健所が 31 %存在し、保健所間で実働班員の確保状況に大きな差があることが分かった。保健所の責任者が持つ不安事項の第 1 位に「実働班の人員不足」を選択した保健所が多かったが、実働班の確保状況に差はなかった。また、関係機関との連携や実働内容の取り決めがないことを最も不安に思う保健所についても、実際に取り決めを行っているか否かとは関連が見られなかった。保健所責任者にとっては、実状如何に係わらず、それらの対策が十分ではないと考えていることが示唆された。

1. 研究の目的

現代のグローバル化した社会では、生物テロあるいは一類感染症は、いつわが国で発生してもおかしくはない。わが国の生物テロ及び一類感染症対策、特に生物テロに対する対応策については欧米諸国に比べて遅れており、現在準備を進めているところである。これらの感染症に関する対策は、人為的なものであれ、自然発生的なものであれ、発症初期の対応においては第一線の診療所、病院、保健所の役割が大きいということが明らかである。国は保健所に対し、「保健所が中心になって対応する」という姿勢で対応策の整備を進めているが、特に生物テロに対するような経験は、これまで保健所は全くもっていないといつてよい。従って、

現状では保健所は十分生物テロや一類感染症に対応できないのではないかと危惧があるが、これまで保健所のこれらに対する対策の実状は全く調べられてこなかった。著者らは厚生労働科学研究費の補助を受けて、2003 年に都道府県レベルの SARS に対する対策実施状況を把握して、問題点、改善点を指摘したが¹⁾、実際に活動する保健所レベルの調査は行えなかった。そこで本研究では、調査対象を生物テロを中心に SARS も一部加え、現在の保健所の準備状況を把握するとともに、保健所の規模や地域によって準備状況に特徴があるのか、あるいは問題点は何かを分析する。さらに保健所の責任者である所長が、現状をどのように意識し、不安を抱えているのか、もし不安があれば