

図8:ショッピングモールでの初発曝露者が40名

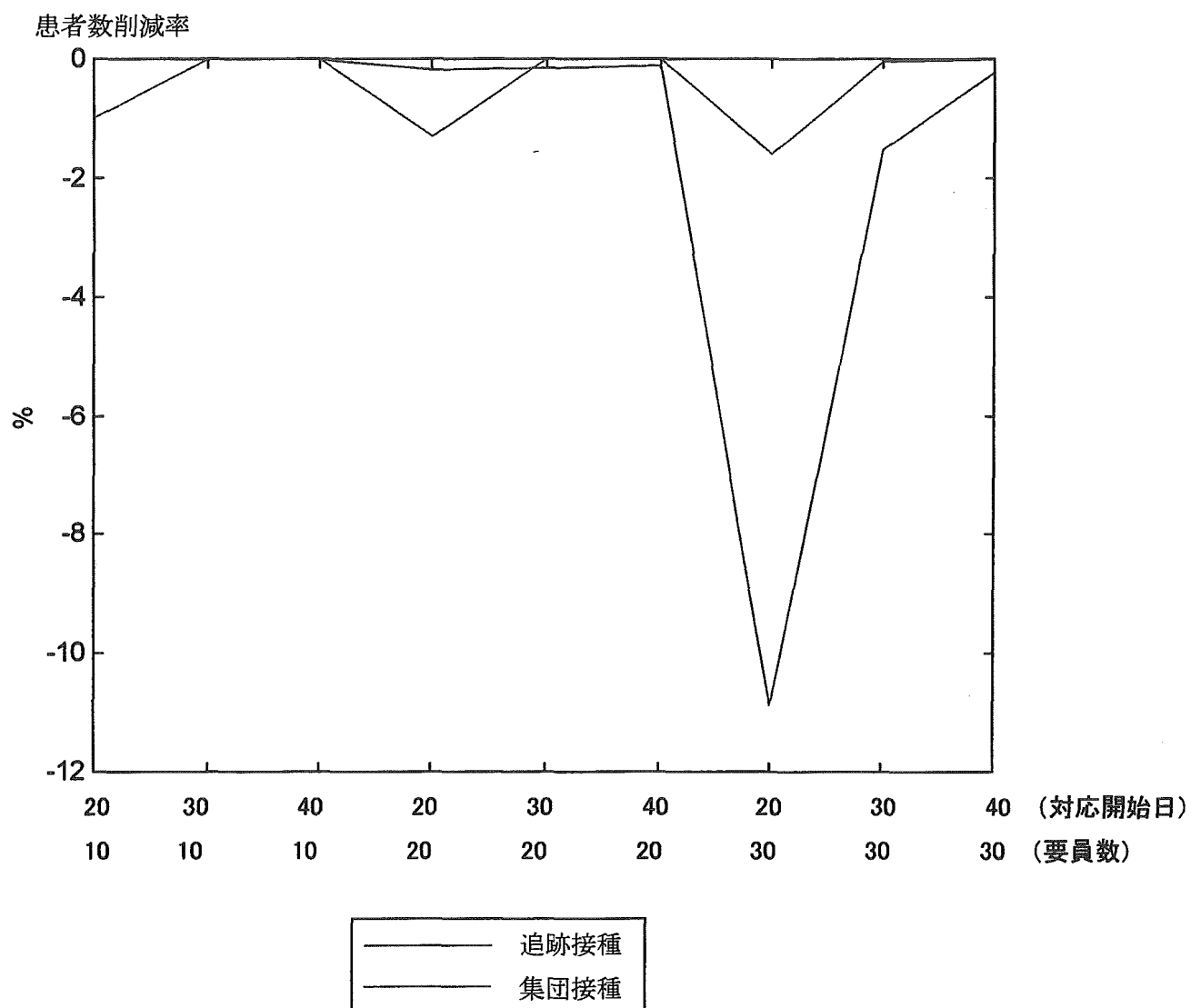
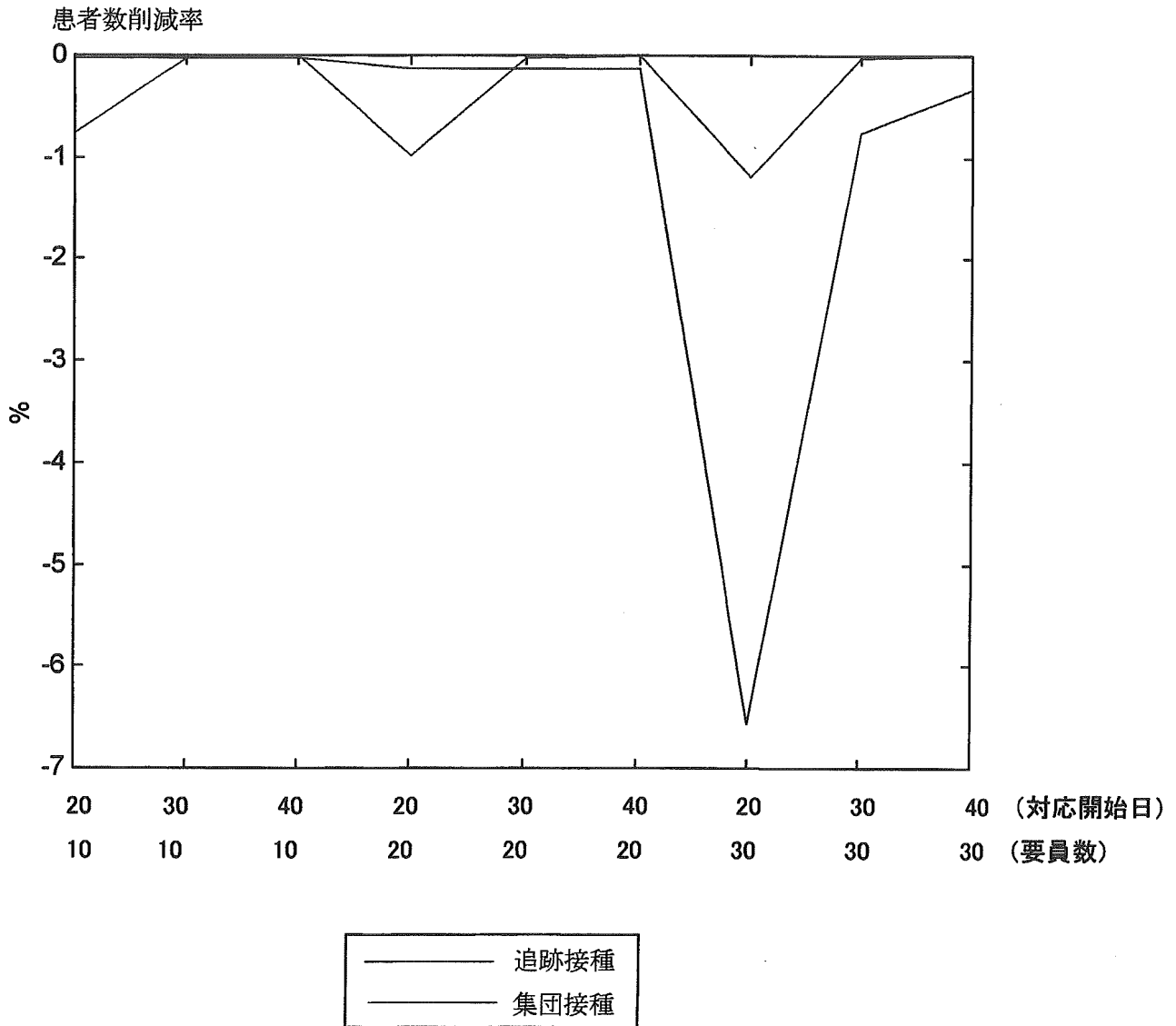


図9:ショッピングモールでの初発曝露者が50名



平成 17 年度厚生労働科学研究費補助金国際健康危機管理ネットワーク強化研究事業  
「生物テロに向けたシミュレーションの構築と介入効果の検討に関する研究」

大日 康史 国立感染症研究所 感染症情報センター  
前田 博志 東京大学 大学院情報理工学系研究科 数理情報学専攻  
合原 一幸 東京大学 生産技術研究所  
独立行政法人科学技術振興機構 ERATO  
合原複雑数理モデルプロジェクト

要約

目的：アメリカのパンデミックプランやWHOでは、パンデミックを地域封鎖で初期に封じ込めることが検討されているが、その日本での可能性を individual based model (ibm) を用いて評価する。

材料と方法：コンピューター上に仮想的な人口約 90 万人の都市を想定し、そこで、学校、職場、高齢者通所施設、ショッピングモール等に徒歩あるいは電車で通い、接触し、感染し、また家庭内で感染する。公衆衛生的対応として、職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設の閉鎖、通勤電車の運行停止、地域封鎖を検討する。

結果：職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設の 1%基準での閉鎖は最大で 15%ポイント罹患率を抑制する効果がある。通勤電車停止によって罹患率では最大 5.7%ポイント低下させる効果がある。地域封鎖に筆湯な半径は、通勤電車での感染がない場合には 90%の確率で 10 km であるが、通勤電車での感染率が高率の場合には 10 km での確率が 70%まで低下し、90%の確率に達するには 13 km が必要となる。

A. 研究目的

新型インフルエンザに対する行動計画の整備は、単に公衆衛生政策上の問題にとどまらず、国家の危機管理上の問題となっており、各国はその整備を進めている。先進国内では比較的遅れていたアメリカが2005年11月3日に公表すると、それを受けて日本においても新型インフルエンザ対策行動計画が11月14日に公表された。アメリカでのプランには地域封鎖や公共交通機関の停止を伴うパンデミック封じ込めについても検討されており、また、数理モデルや統計学モデルの開発、情報収集に国際機関を通じての協力がうたわれている。

翻って日本の行動計画では、予防接種や抗

ウイルス剤(タミフル等)の投与に加えて、現行法上可能な公衆衛生的な対応として、休校、出勤停止が盛り込まれている。

休校は学校保健法第13条「学校の設置者は、伝染病予防上必要があるときは、臨時に、学校の全部又は一部の休業を行うことができる。」に基づくものであり行動計画では予防的な臨時休業を要請している。

職場閉鎖ではないが有症者の就業制限は、感染症の予防及び感染症の患者に対する医療に関する法律第18条第2項「前項に規定する患者及び無症状病原体保有者は、当該者又はその保護者が同項の規定による通知を受けた場合には、感染症を公衆にまん延させるおそれがある業務として感染症ごとに厚生労働省令で定める業務に、そのおそれがな

くなるまでの期間として感染症ごとに厚生労働省令で定める期間従事してはならない。」とされているが、行動計画では患者の出勤停止の勧告にとどまっている。また、感染症の予防及び感染症の患者に対する医療に関する法律第32条第1、2項「1、都道府県知事は、一類感染症の病原体に汚染され、又は汚染された疑いがある建物について、当該感染症のまん延を防止するため必要があると認める場合であつて、消毒により難いときは、厚生労働省令で定めるところにより、期間を定めて、当該建物への立入りを制限し、又は禁止することができる。2、都道府県知事は、前項に規定する措置によつても一類感染症のまん延を防止できない場合であつて、緊急の必要があると認められるときに限り、政令で定める基準に従い、当該感染症のまん延の防止のために必要な措置を講ずることができる。」ため、建物への立入禁止を行うことができる。

地域封鎖は、行動計画には盛り込まれていないが、交通の遮断として感染症の予防及び感染症の患者に対する医療に関する法律第33条として「都道府県知事は、一類感染症のまん延を防止するため緊急の必要があると認める場合であつて、消毒により難いときは、政令で定める基準に従い、72時間以内の期間を定めて、当該感染症の患者がいる場所その他当該感染症の病原体に汚染され、又は汚染された疑いがある場所の交通を制限し、又は遮断することができる。」とされている。

そうした各国の行動計画策定の基礎となり、また評価手段として、2005年6月ロンドンでのGlobal Health Security Action Group MeetingでFerguson<sup>1)</sup>がLonginiら<sup>2)</sup>の研究が報告された。これらはいずれも従来の数理モデルではなく、国民一人一人の行動をコンピューター上でシミュレートし、接触させ、感染させることによって、感染拡大の予測や公衆衛生的対応の評価を行うもので individual based model

(ibm)と呼ばれている。同会議としても ibm を realtime estimation と合わせてパンデミック対策の中心に添えることが合意された。

Ferguson<sup>1)</sup>はその後8月に Nature に公刊された。そこでは実際のタイおよびその周辺国国境付近の人口分布にあわせた8500万人が ibm としてモデル化されており、患者は発症2日目に受診して探知されるとして、直ちに5kmの地域封鎖をして抗ウイルス剤を予防的に投与すれば90%の確率で封じ込めに成功するとしている。

Longini<sup>2)</sup>はやはり8月に Science に公刊されたが、そこではタイの農村地域をモデル化した50万人の ibm で、抗ウイルス剤、隔離、予防接種の効果を検討し、やはり封じ込めは可能であると結論づけている。

こうした研究を背景に先のアメカのプランが作成され、また、2006年1月12-13日でのWHO東京会議では、WHOのプランとしての初期封じ込めが検討されるに至った。

そうした状況において、日本においても ibm モデルを開発し、先行研究に対して研究レベルで遅れないようにすることが重要であることと同時に、行動計画を策定するにあつても、休校、職場閉鎖は効果があるのか、あるいは推奨された地域封鎖が日本でも効果的に成り立つ可能性があるか、あるとすればどの範囲を封鎖する必要があるのか、日本(あるいはアジア)に特有の満員電車・バスのリスクはどのように評価されるのか、という疑問にこたえる必要がある。実際・東京都のパンデミックプランでは電車運行の制限が盛り込まれている。

それに答えるためには、学校、職場、地域あるいは電車といった人が集積する箇所をモデル化する必要があり、人口、人口密度、家族形態、通勤距離等で地方都市を表現してそこの対策の検討が必要となる。そのためには物理的な距離感覚をモデル内に入れる必要があり、従来の数理モデルでは、そうした情報

をモデル化できない。そこでやはり一人一人がモデル上で行動し、感染する ibm の開発が必要となった。

## B. 材料と方法

### B-1. 都市の構造

モデル上に図 1 のような 1 つの都市を作る。まず、一辺の長さが 30 の 2 次元正方格子を考える。ここで、1 つの格子が 1 世帯に対応する。この 2 次元正方格子を校区と呼ぶ。つまり、1 つの校区には 900 の世帯が存在する。このような校区を縦 20 個、横 20 個並べたものを都市とする。つまり、都市には 36 万世帯が存在する。都市の概略図を図 1 に示す。また、1 つの校区の一辺の長さを 1km とする。

1 世帯は 1 人から 6 人家族とし、世帯員には成人 1、成人 2、子ども 1、子ども 2、高齢者の 5 種類がいる。成人 1 が主に家庭の外で働く成人、成人 2 が主に家庭で働く成人、子ども 1 が学校に通う子ども、子ども 2 が幼稚園に通う子ども、高齢者は高齢者通所施設に通うとする。

世帯構成の分布は平成 12 年度国政調査に従い表 1 とする。家族類型として、夫婦のみの世帯、夫婦と子どもからなる世帯、夫婦と子どもと高齢の両親からなる世帯、夫婦と子どもと高齢のひとり親からなる世帯、単身世帯、の 5 種類を考える。

平成 12 年度の国勢調査における 1 世帯の平均人員は 2.67 人であるが、モデル上では約 2.49 人である。都市には 36 万世帯が存在するから、人口は約 90 万人となる。

### B-2. 自然史

自然史を図 2 に示す。状態間の遷移確率、およびそれぞれの状態における就床率は先行

研究<sup>1)</sup>による。就床率は、社会活動を停止し、医療機関を受診し自宅で休養する割合で、この場合感染は家族内のみになる。以下では就床率と受診率は同義に用いる。なお、本稿では感染拡大の過程をモデル化することを主目的とするために死亡は考えない。

### B-3. 接触過程

接触する場所として、家庭、近所、地域、職場、通勤電車、ショッピングセンター、学校、幼稚園、高齢者通所施設を想定する。その場所において接触により感染するか否かの確率は先行研究<sup>3)</sup>によるとし、想定されていない部分は新たに仮定する。ここで、近所とはある世帯の周囲 1 世帯の世帯員である。地域とはある世帯の周囲 10 世帯以内の世帯の世帯員である。

職場とは各校区に 1 つずつ存在し、成人 1 が通勤する。平成 12 年度国政調査における通勤時間の分布(表 2)にしたがって、個々の成人 1 に勤務先を割り当てる。成人 1 の一部は通勤時に通勤電車を利用する。図 3 に示されているように、都市の中央に上下方向に通勤電車が走り、校区ごとに駅が設定されている。通勤電車は上下方向に 1 日 1 往復運行されており、同じ方向へ向かう乗客は全て同じ通勤電車に乗り合わせるとする。各成人 1 は「家庭から職場までの直線距離」と「家庭から家庭の最寄り駅までの距離と職場から職場の最寄り駅までの距離の和」の 2 つを比較し、前者が短い場合には通勤電車で通勤せず徒歩で通勤する。この場合、通勤時における他の者との接触はない。一方、後者が短い場合、通勤電車を利用する。通勤電車で通勤する成人 1 は家庭の最寄り駅から職場の最寄り駅までの区間を乗車する(図 4)。通勤電車における感染は先行研究<sup>1)</sup>では検討されていないために、症状期の者が乗っている場合 1 区

間あたり一定の確率で感染するとする。

ショッピングセンターは各校区に1つずつ存在し、その校区の成人2が集う。学校は各校区に1つずつ存在し、その校区の子ども1が通学する。幼稚園も各校区に1つずつ存在し、その校区の子ども2が通園する。高齢者通所施設とは各校区に1つずつ存在し、その校区の高齢者が集う。高齢者通所施設での感染確率は先行研究<sup>1)</sup>で想定されていないので1日あたり0.01の確率で感染すると想定する。

#### B-4. 公衆衛生的対応

本稿では公衆衛生的対応として次の3通りの方策を検討する。まず第一に職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設の閉鎖である。これは職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設における欠席・欠勤率が設定値を超えると3日間閉鎖する。3日後にその職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設での欠席・欠勤率が基準値を下回っていれば閉鎖が解除されるが、上回っていればさらに3日間閉鎖が継続される。閉鎖されればその職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設での接触はなくなる。また、職場が閉鎖された場合、その職場に通勤電車で通勤する成人1は通勤電車を利用しなくなるので、通勤電車での接触もなくなる。

また、公衆衛生的対応として通勤電車の停止を検討する。これは都市全体での受診率が設定値を超えると、通勤電車を停止する。都市全体の受診率が設定値を下回れば、通勤電車の停止が解除される。通勤電車が停止されると、通勤電車での接触はなくなるが、通勤電車を利用して通勤している成人1は職場に通えなくなるので、職場での接触もなくなる。

最後の公衆衛生的対応として地域封鎖を検討する。これは、受診者が20人を越えた時点で流行が探知され、公衆衛生的対応がとられ

るとして感染者の拡大半径を測定する。この半径が封鎖に必要な地域の大きさとなる。

#### B-5. 感度分析

公衆衛生的対応の基準として、職場や学校等の閉鎖基準として閉鎖なし、25%の欠席・欠勤率、5%の欠席・欠勤率、1%の欠席・欠勤率を検討する。また、通勤電車の運行停止の基準として、閉鎖なし、25%の都市全体での就床率、5%の都市全体での就床率、1%の都市全体での就床率を検討する。

また、通勤電車での感染率として、感染なし、中程度( $10^{-5}$ )、高程度(中程度の5倍)を想定する。

#### C. 結果

シミュレーションした結果は図6-9にまとめられている。図6は新規感染者数、就床者数の推移が職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設の閉鎖を行わない場合、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、欠席・欠勤率1%で閉鎖を行う場合毎に示している。

図7は通勤電車における感染率の影響を示している。通勤電車での感染がない場合、低率、高率の場合それぞれでの、職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設の閉鎖を行わない場合と、職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設を欠席・欠勤率1%で閉鎖を行う場合での新規感染者数、就床者数の推移が示されている。

図8は通勤電車運行停止の効果を示している。

通勤電車での感染率は低率を仮定した上で、通勤電車の停止をしない場合と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それぞれでの、職場、学校、幼稚園、高齢

者通所施設の閉鎖を行わない場合と、職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設を欠席・欠勤率 1%で閉鎖を行う場合での新規感染者数、就床者数の推移が示されている。

図 9 は通勤電車での感染がない場合、通勤電車での感染率が低率、高率の場合それぞれでの、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。

表 3, 4 に最終的な罹患率と就床率が示されている。

#### D. 考察

最終的な罹患率では、職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設の 1%基準での閉鎖は通勤電車の停止がない場合では 15%ポイント、5%基準での閉鎖では 5%ポイント弱の罹患率抑制の効果がある。就床率では、それぞれ 10%ポイント、3%ポイント程度の就床者の抑制効果がある。実際の休校の基準は約 30%とされているので、ほとんど効果はないと推測される。

通勤電車での感染率が低率の場合、通勤電車停止によって罹患率では最大 5.7%ポイント、就床率では 2.4%ポイント低下させる効果がある。ただし、職場、学校、幼稚園、高齢者通所施設が 1%基準で閉鎖されると、通勤電車の効果は非常に限定的となる。

就床者が 20 名に達した時点で、公衆衛生当局に探知され、地域封鎖がとられるとしてその必要な半径は、電車での感染がない場合には 90%の確率で 10kmである。通勤電車でも程度の感染率があると、10kmでの確率が 80%まで低下し、90%の確率に達するには 12kmが必要である。通勤電車での感染率が高率の場合には、10kmでの確率が 70%まで低下し、90%の確率に達するには 13kmが必要となる。

この就床者が 20 名に達した時点としたのは、症候群サーベイランス等でクラスターを発見できる最短時間であると考えられる時点として

定義した。これが例えば 10 名で探知できれば、さらに地域封鎖に必要な感染拡大半径は縮小する。したがって、本稿で提示したモデルを用いて症候群サーベイランスの価値を評価していくことは意義深いと思われる。

残された課題として、都市間の移動を表現するモデルを構築することが必要であろう。それによって都市間の拡散速度と、交通の遮断の影響を評価できる。いわば本稿が行った都市内の解析を都市間に拡張することに他ならない。また、逆に学校や職場の規模、電車での構造といった都市内のモデルの作り込みも同時に必要である。

#### F. 健康危険情報

特になし

#### G. 論文発表

特になし

#### H. 知的財産権の出願・登録情報

(予定を含む)

特になし

#### 参考文献

- [1] Ferguson NM., DAT Cummings, S Cauchemez, C Fraser, Steaven Riley, A Meeyai, S Iamsirithaworn, and DS Burke: "Strategies for containing an emerging influenza pandemic in Southeast Asia", Nature vol.437, pp.209-214, 2005.
- [2] Longini Jr.IM., A Nizam, S Xu, K Ungchusak, W Hanshaoworakul, DAT Cummings, and ME Halloran: "Containing Pandemic Influenza at the Source", Science vol.309, pp.1083-1087, 2005.
- [3] Halloran, ME, IM Longini, DM Cowart,

and A Nizam: "Community interventions  
and the epidemic prevention potential",

Vaccine vol.20, pp.3254-3262, 2002.



表 1：世帯構成

	成人1	成人2	子ども1	子ども2	高齢者	比率[%]
夫婦のみの世帯	1	1	-	-	-	12.4
	-	-	-	-	2	9.6
夫婦と子どもから成る世帯	1	1	1	-	-	9.65
	1	1	-	1	-	9.65
	1	1	1	1	-	17.8
夫婦と子どもと高齢の両親から成る世帯	1	1	1	-	2	0.6
	1	1	-	1	2	0.6
	1	1	1	1	2	2.4
夫婦と子どもと高齢のひとり親から成る世帯	1	1	1	-	1	1.25
	1	1	-	1	1	1.25
	1	1	1	1	1	2.7
単身世帯	1	-	-	-	-	24.6
	-	-	-	-	1	7.5

出典：国勢調査(2000)

表 2 : 通勤時間の分布

通勤距離[km]	通勤時間[分]	人数	割合[%]
0-5	0-29	32,728,470	55
5-10	30-59	15,321,198	26
~	60-89	8,040,084	~
~	90-119	2,536,876	~
10-	120-149	652,387	19
~	150-179	118,374	~
~	180-	111,823	~

出典：国勢調査(2000)

表 1：世帯の家族類型

	世帯数	比率[%]
夫婦のみの世帯	8,835,119	22.0
夫婦と子どもから成る世帯	14,919,185	37.1
夫婦,子どもと両親から成る世帯	1,441,698	3.6
夫婦,子どもとひとり親から成る世帯	2,083,801	5.2
単独世帯	12,911,318	32.1

世帯主の年齢	65歳未満	65歳以上
夫婦のみの世帯	4,980,759	3,854,360
単独世帯	9,879,178	3,032,140

表 3 : 世帯員の分布

	3人	4人	5人	6人	7人以上
夫婦と子どもからなる世帯	6,805,958	6,261,077	1,642,271	179,650	30,229
夫婦と子どもと高齢の両親からなる世帯	-	-	366,791	700,822	374,085
夫婦と子どもと高齢ひとり親からなる世帯	-	821,249	873,170	346,033	43,349

移行確率

	1日目	2日目	3日目	4日目
潜伏期から症状期へ	0.3	0.5	1.0	-
症状期から回復期へ	0.3	0.4	0.2	1.0

症状期の寝込む確率

	1日目	2日目	3日目
成人1	0.1	0.3	0.1
成人2	0.1	0.3	0.1
子ども1	0.308	0.4	0.096
子ども2	0.2025	0.3975	0.15
高齢者	0.3	0.4	0.3

家庭での感染確率

	成人1	成人2	子ども1	子ども2
成人1	-	0.08	0.06	0.06
成人2	0.08	-	0.06	0.06
子ども1	0.06	0.06	-	0.16
子ども2	0.06	0.06	0.16	-

表3：最終的な罹患率

		通勤電車での感染率			
		感染 なし	低率		高率
			停止なし	1%で 停止	停止なし
閉鎖なし		58.3%	66.1%	60.4%	63.3%
5%で閉鎖	学校、幼稚園、高齢者 通諸施設	53.7%	61.4%	57.1%	59.0%
	職場、学校、幼稚園、 高齢者通諸施設	53.7%	61.3%	57.1%	59.0%
1%で閉鎖	学校、幼稚園、高齢者 通諸施設	43.3%	51.0%	49.2%	49.8%
	職場、学校、幼稚園、 高齢者通諸施設	42.9%	49.0%	48.7%	50.2%

表4：最終的な就床率

		通勤電車での感染率			
		感染 なし	低率		高率
			停止なし	1%で 停止	停止なし
閉鎖なし		33.2%	36.4%	34.0%	35.2%
5%で閉鎖	学校、幼稚園、高齢者 通諸施設	30.2%	33.3%	31.7%	32.3%
	職場、学校、幼稚園、 高齢者通諸施設	30.2%	33.3%	31.7%	32.3%
1%で閉鎖	学校、幼稚園、高齢者 通諸施設	23.7%	26.8%	26.4%	26.3%
	職場、学校、幼稚園、 高齢者通諸施設	23.5%	26.3	26.3%	26.7%

図 1 : 都市の概略図

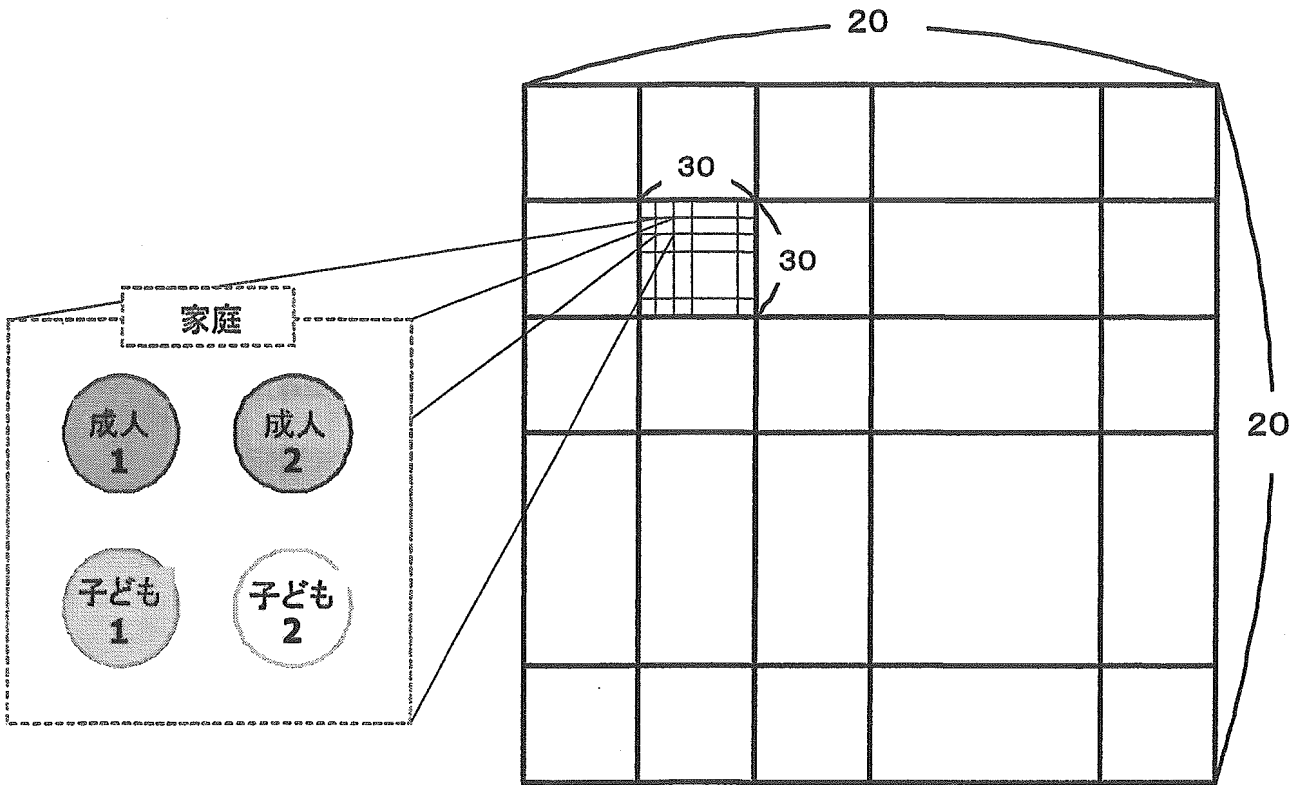
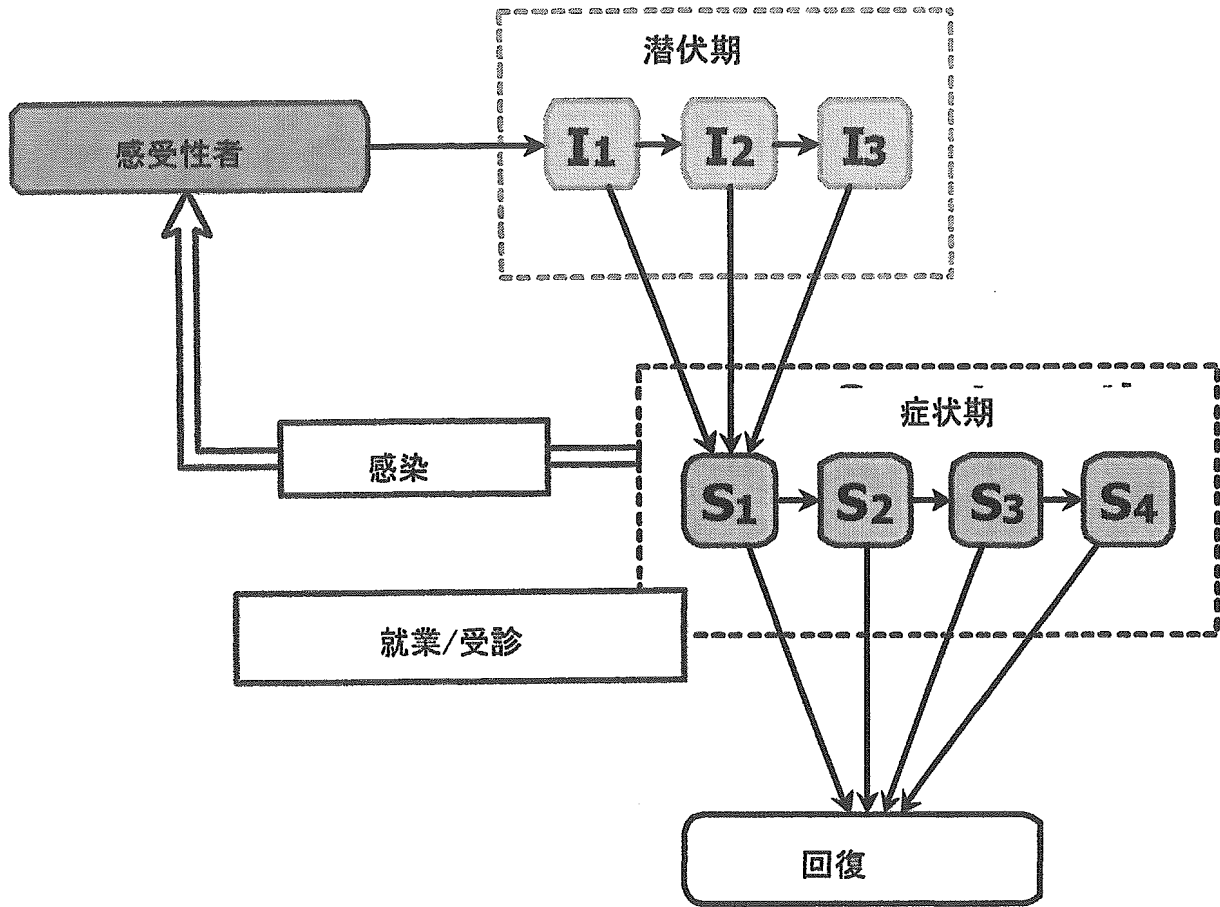
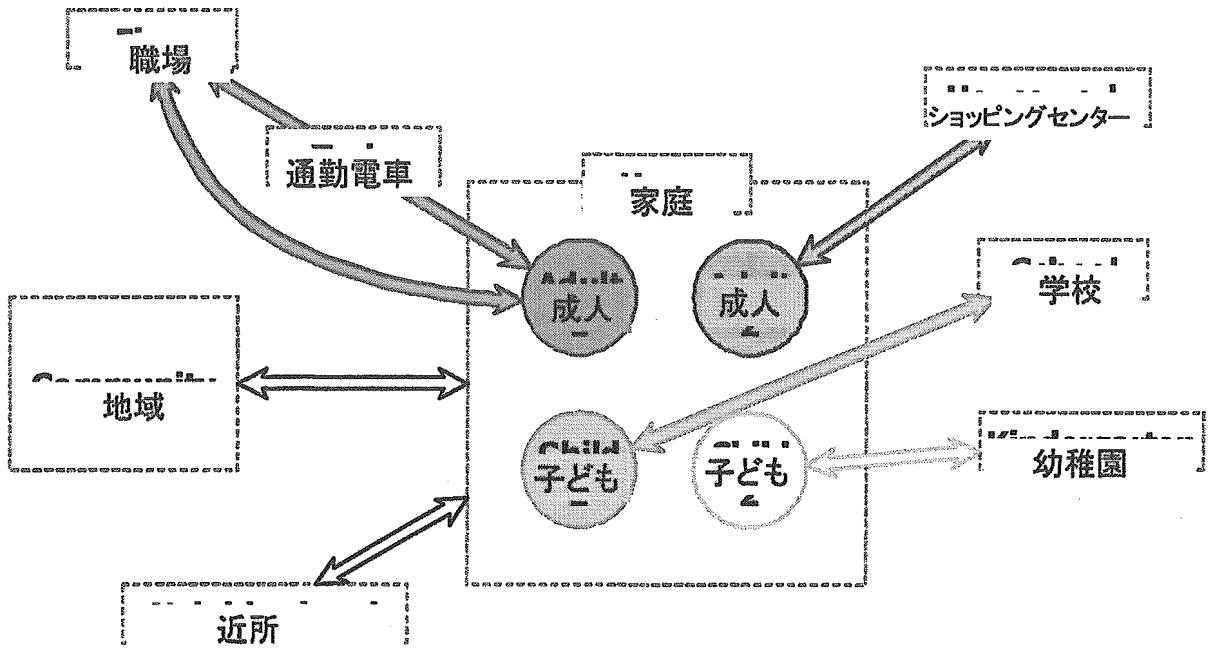


図 2: 状態遷移の概略図







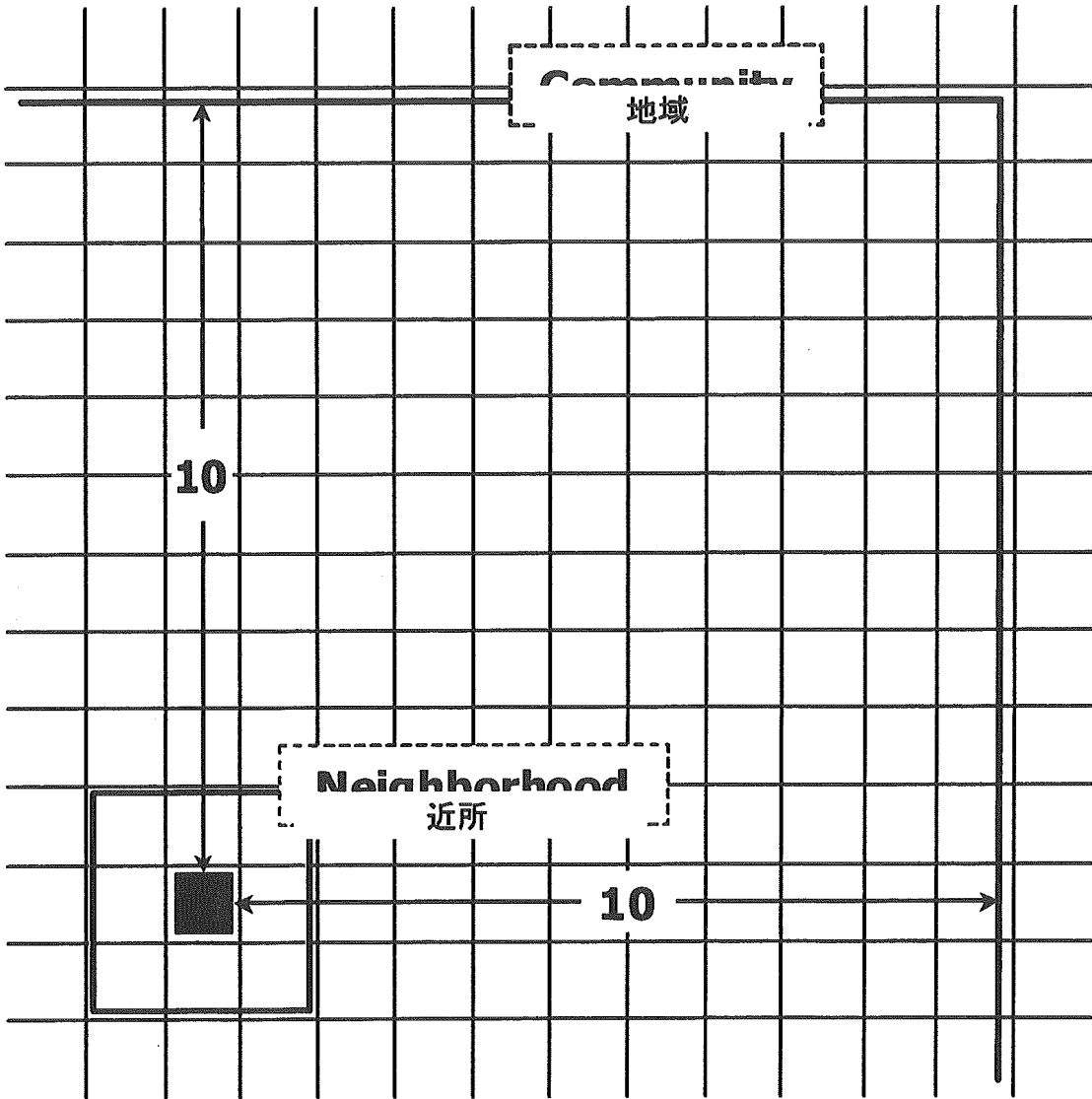


図 3:通勤電車の概略図

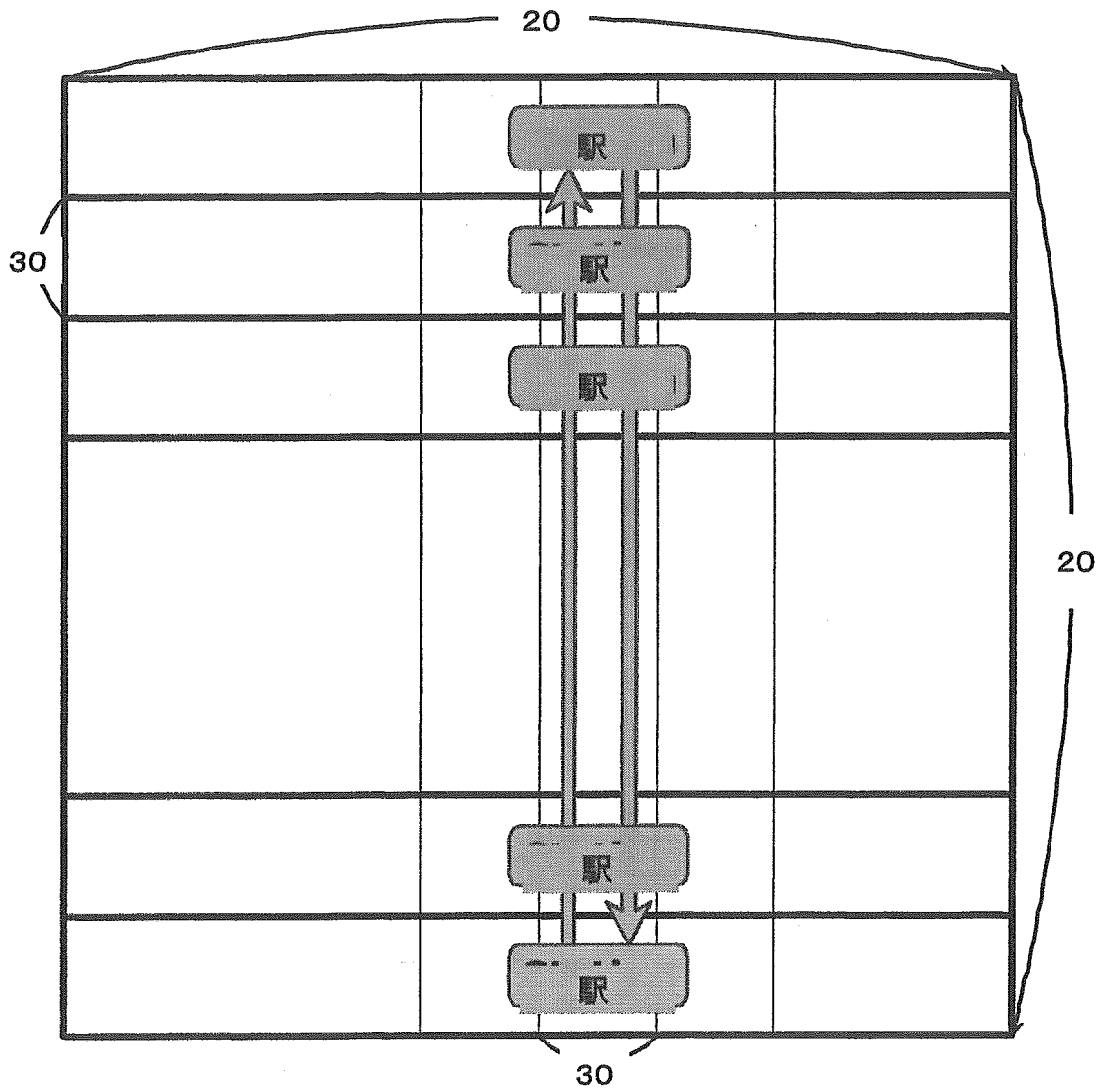


図 4: 通勤電車の利用する場合

