

免役及び抗体を考慮したエージェントベース感染モデル

Agent-based Model of Infectious Disease that Incorporates the Role of Immune cells and Antibodies

Shigeaki OGIBAYASHI

Emeritus Professor of Chiba Institute of Technology

3-5-8 Mafune, Kisarazu, Chiba, Japan

荻林 成章

千葉工業大学名誉教授

千葉県木更津市真舟 3-5-8

Abstract

An agent-based infection model that takes into account the role of immune cells and antibodies has been constructed, and the effects of various factors on the spread and convergence of infection were analyzed. The obtained results show that the calculated behavior of infection spread and recovery was qualitatively consistent with the actual phenomenon. The model also reproduced the occurrence of second wave after the regulation and mitigation of social movement. The fundamental mechanism of a pandemic is that the probability of a healthy person encountering an infected person progressively increases or decreases as the number of infected persons or recovered persons increases. The existence of antibodies is not an essential factor for this mechanism. The model also revealed that the time required for recovery becomes short as the number of invaded viruses decreases, indicating that measuring body temperature could help identify the infected person who is highly harmful, having a large number of viruses. To control the spread of infection while minimizing economic deterioration, it is essential to identify and exclusively regulate highly dangerous infected persons' behavior, including self-regulation, by monitoring body temperature.

要旨

免疫と抗体及びウイルスの数を考慮した ABM 感染モデルを構築し、感染の拡大と収束に及ぼす諸要因の影響を解析した。その結果以下の事柄が判明した。新規感染者数、新規回復者数、総感染者の推移の計算値は実現象と定性的に一致した。またモデルにより移動制限解除後の第 2 波の生成も再現された。感染拡大と収束の基本メカニズムは、健全者が感染者と接触する確率が感染に伴い累進的に増加すること、及び回復者の増加に伴い上記確率が累進的に低下することである。抗体の存在は感染の収束安定化に寄与するがメカニズムの本質的要因ではない。また感染時に健常者に移転されるウイルス数が少ないほど回復に要する期間は短くなる。体温は保有するウイルス数多寡の尺度となりうるため、検温は実害性の高い感染者を優先的に識別し排除する上で有効である。感染拡大の抑制と経済悪化防止を両立させるためには、感染者を識別し体温が高く感染力の高い有害な感染者についてのみその行動を制限すること、及び各自検温に基づく自発的行動制限を励行し、健全者が感染者と遭遇する確率を低下することが肝要である。

目次

1. はじめに	4.4 抗体発生なしの場合の感染拡大と収束の傾向
2. モデル	5. 考察 感染の拡大・収束の基本メカニズムと感染拡大防止策の提案
1.1 モデルの概要	5.1 感染拡大収束の基本メカニズム
1.2 計算方法	5.2 感染拡大収束の過程におけるウイルス個数の挙動
3. 実験条件	5.3 感染拡大の抑制と防止策
4. 実験結果	6. 結論
4.1 感染と治癒の基本挙動	
4.2 実データとの比較	
4.3 移動制限と解除及びウイルス吸収率の影響	

1. はじめに

2019 年 12 月以来、中国武漢で始まったコロナウイルスは世界中に拡散し多くの国において今なお感染者は増加しつつある。その一方で、日本をはじめいくつかの国や都市では外出規制等の対策によって新規感染者や新規死者数が減少に転じ低位安定に推移している [17] ことから外出規制を緩和し経済活動を再開する動きが始まっている。その一方で第 2 波の新規感染者の増加が危惧され、マスク着用等コロナと共に生きる生活習慣の模索が始まっている。

昨今のように感染症の制圧と共存が大きな社会問題として取り上げられる以前から感染症流行を予測することは公衆衛生上の一つの大きな課題であり、数理モデルが古くから提案されている [1-6]。

これらの数理モデルは決定論的モデルと確率論的モデルに分類できるが、それらの多くは個体群動態を想定して感染症に関わる状態に依存した人口（感染可能人口、感染者人口、回復者人口等）を変数として表し時間変化記述した方程式群を連立して解く形式のモデルである。しかしながら感染症伝播の現象は感染症に関わる種々の状態の人間の多様な行動と相互作用の結果生じるものであり、これらの方程式ベースのモデルでは人間の多様な行動と相互作用を記述することはできないという本質的問題を有している。また感染者が回復する過程についてはモデル化されていないため、どのような条件が回復に影響するかに関する知見は得られない。

人間の行動の多様性を記述するモデリング手法としてエージェントベースモデリング（以下 ABM と略す）がある [7-8]。ABM は実社会システムと類似な行動原理からなる人工社会をコンピュータ上に構築し、多様な人間行動とその相互作用の結果として生じる現象の創発を再現するボトムアップなモデリング手法であり、経済や社会の諸問題のメカニズム理解や問題解決に大きな効果を上げている [8-11]。ABM には多様性や離散事象を扱えること、マクロ事象に関わる知識なしにモデル構築が可能、等の様々な特徴があるが [7]、それらの中で最も本質的な特徴はボトムアップなモデリング手法である点である。社会現象は人間の行動とその相互作用の結果としてボトムアップに生じる。ABM はこの基本原理に基づくモデリング手法であり、実社会と同じ原理で作動する人工社会をコンピュータ上に構築し、様々なマクロ現象の原因となる因子を種々変更しマクロ現象再現に必要なモデル構造を明らかにすることによって、マクロ現象のメカニズムに関する理解を深め問題解決の方法を検討することが可能である。但し、これを実現するためには、モデルが 100%ボトムアップなモデルであること、即ちマクロな因子に関わる仮定は一切採用していないこと、及び実社会のマクロ

現象の創発の原因となるシステム構造を有していることが肝要である[9-11]。

感染症をはじめ様々な病気の問題に対して ABM を適用する試みは ABM の中でも比較的新しい研究領域であるが、既に様々なモデルが報告されている[12-15]。しかしながらこれらのモデルは、確率分布を仮定するなどマクロな因子を仮定に含めている結果、100%ボトムアップとはなっていないモデルが多い。また人と人の遭遇に関しては100%ボトムアップなモデルにおいても、感染伝播に関わる人間間の相互作用自体は精緻にかつボトムアップにモデル化しているものの、感染後回復に至る過程については、例えば感染後所定時間を経過すると感染されず他人を感染させることもない存在となる等、マクロな仮定が含まれていて、感染から回復に至る過程がボトムアップにモデル化されていない例が多い[12]。これらのモデルでは、感染者が拡大して現象する過程は再現できても、感染者数のピークやその後に来る回復者ピークが生じる時期や、移動制限とその後の制限緩和や第2波の発生などについての知見は得られない。

一方で、コロナウイルスに関する近年の疫学的な研究では、感染後最初に機能するのは自然免疫であり、その後抗体が生成し、これらのウイルス排除機能のお蔭で、感染者の多くが自然治癒することが知られている[16]。またコロナウイルスに関する統計的データによれば、コロナウイルスによる致死率は極めて小さく、かつこれまでの感染者の内抗体を保有している人も極めて少ないことが知られている[18]。また外出規制などで少なくとも一旦はパンデミックが終焉したと見られる国の統計的データによれば、新規感染者がピークを示した後に感染者数がピークを示し、更にその後回復者がピークを示すことが知られている[17]。しかしながら、これらの、感染から回復に至る過程をモデル化したエージェントベースモデルは見られない。

そこで、本研究では、自然免疫と抗体の働きを考慮したエージェントベースモデルを構築し、感染拡大と収束の挙動の計算結果を実現象と比較するとともに、感染拡大メカニズム及び感染抑制と経済を両立させるための条件について検討した。

2. モデル

2.1 モデルの概要

本モデルは免疫と抗体およびウイルス個数を考慮し、感染後回復過程を医学的知見に基づきボトムアップにモデル化していることを特徴としている。一方、人間相互の接触に関わる部分はランダムを仮定して簡便なモデルとした。

本モデルでは初期の感染者（ウイルス保有者）を一人と仮定し、人間を2次元空間内でランダムに移動するオブジェクトとし、各人間が所定の距離内で遭遇した時に遭遇相手が感染者である場合に、遭遇相手（感染者）のウイルスの一部が咳などの効果によって物理的に対外へ放出され、その一部が新規遭遇者の体内に混入する（感染する）ことによって感染が伝播する。体内に混入したウイルスは、初期には自然免疫によって所定の割合で個数が減少し、その後抗体が発生するとその抗体特有の割合で個数が減少する。体内に残留したウイルスは所定の割合で増殖し、その値に新規感染によって混入したウイルスが加わって次ステップのウイルス個数となる。新たな感染がなければウイルス個数は自然免疫または抗体的作用によって漸減し、ウイルスの数が下限値未満となった時点で、回復したとみなされ新規回復者となる。

本モデルにおけるウイルス個数変化に関わる仮定をまとめて以下に記す。

2.1.1 初期条件

エージェント数は 2000 人とし、その内の 1 人が感染者とする。エリアは 1000×1000 とし、エージェントの初期位置は $[1, 1000]$ の一様乱数で決定する。感染者が初期に保有するウイルス個数は 5×10^5 とした。ここでウイルス個数は任意単位で表示し、ゼロとみなす最小ウイルス個数は 10^{11} とした。

2.1.2 感染によるウイルス個数の変化

各エージェントは毎期最大距離の範囲内でランダムに移動すると仮定する。移動距離は $[1, \text{最大移動距離}]$ の一様乱数で決定し、移動角度は $[0, 2\pi]$ の一様乱数で与える。移動結果の新座標 (x, y) が 1000×1000 の範囲から外れた場合には x 又は y に 1000 を加算するか減算する。遭遇したエージェントとの距離が 5 m の範囲内にある場合に、そのエージェントを neighbor と呼び、そのエージェントが感染者である場合にはそのエージェントを infected neighbor と呼ぶ。Infected neighbor は体内に保有しているウイルスの一部を咳などの効果により毎期一定の割合 (virus-releasing rate) で体外にウイルスを放出し、放出されたウイルスの一部が毎期一定の割合 (virus-absorbing rate) で当該エージェントに移転されると仮定する。virus-releasing rate 及び virus-absorbing rate はそれぞれ 0.1 ± 0.05 の一様乱数で与えエージェント固有の値とした。これらの値はマスクやフェースシールドによって変化することを想定している。以上を仮定すると、ウイルスの放出と吸収の作用の結果、感染者と 5m の範囲内に遭遇した未感染エージェントは感染者のウイルスの一部を吸収し、新規感染者となり、新規感染によって増加するウイルス個数は(1)式で与えられる。

$$\Delta N_{Infected}^i(t) = \sum_{j \in \text{neighbors}} N_{VP}^j(t) * Rate_{Release}^j * Rate_{absorb}^i \quad (1)$$

where, $\Delta N_{Infected}^i(t)$: number of viruses of agent i transferred from neighbor agents at the time t

$N_{VP}^j(t)$: number of viruses of agent j at the time t

$Rate_{Release}^j$: virus releasing rate of agent j

$Rate_{absorb}^i$: virus absorbing rate of agent i

2.1.3 免疫および抗体の働きによるウイルス個数の変化

エージェントが感染すると、初期には自然免疫の作用によって、一定期間が経過すると抗体の作用によってウイルス個数は一定の割合 (virus-attack rate of immune cells または virus-attack rate of antibodies) で毎期減少すると仮定する。以上の仮定より、免疫または抗体によるウイルス個数減少量は(2)式で与えられる。Virus-attack rate は自然免疫に比べて抗体の方が大きいと想定されるため、それぞれ、 0.3 ± 0.1 、 0.5 ± 0.1 の一様乱数で与えエージェント固有の値とした。

$$\Delta N_{VP}^i(t) = N_{VP}^i(t) * Rate_{attack}^i \quad (2)$$

where, $\Delta N_{VP}^i(t)$: Decreasing increment of the number of viruses during the time step t

$Rate_{attack}^i$ = Virus attack rate of immune cells or antibodies

感染から一定期間経過してもなおウイルス個数が十分に多い場合に抗体が発生すると仮定し、抗体発生条件を(3)式のように仮定した。(3)式において抗体発生の限界経過期間 (elapsed period after infection for antibody emergence) は 7 ± 2 の一様乱数で与えエージェント固有の値とした。また抗体発生の限界ウイルス個数は感染時のウイルス個数の定数倍 (virus-count multiple for antibody emergence) と仮定し、その値は 0.5 プラスマイナス 0.2 と仮定した。ここで限界経過期

間は医学的知見から平均7日と知られていることを参考に決定した。抗体発生の限界ウイルス個数については一定値としての医学的知見はみあたらないため(2)式のように感染時のウイルス個数の定数倍とした。

$$t - t_{infected}^i > t_{antibody_emerging}^i \quad \text{and} \quad N_{VP}^i(t) > N_{VP}^i(t_{infected}^i) * Multiple_{antibody_emergence}^i \quad (3)$$

where, t : Current time, $t_{infected}^i$: Time of infection of agent i

$t_{antibody_emerging}^i$: Elapsed period after infection for antibody emergence of agent i

$Multiple_{antibody_emergence}^i$: Virus count multiple for antibody emergence

2.1.4 ウイルス増殖を考慮したウイルス個数の変化

ウイルスの対外への放出と免疫の作用によって減少した残りのウイルスは一定のウイルス増殖率 (virus replication rate) で増殖すると仮定する。増殖率はウイルス固有の特性値と考えて、エージェント共通の一定値と仮定しパラメータ値として与える。新規感染があった場合にはこのウイルス個数に新規感染によるウイルス個数が加わる。これらの仮定より、毎期のウイルス個数は(4)式に従い更新する。

$$N_{VP}^i(t+1) = (1 - Rate_{Release}^i - Rate_{attack}^i) * N_{VP}^i(t) * Rate_{growth} + \Delta N_{Infected}^i(t) \quad (4)$$

where, $Rate_{Release}^i$: virus releasing rate of agent i

$Rate_{attack}^i$: Virus attack rate of immune cells or antibodies of agent i

$Rate_{growth}$: Virus replication rate defined as a constant value

$\Delta N_{Infected}^i(t)$: Increasing increment of the number of viruses due to infection

2.1.5 ゼロとみなす最小ウイルス個数

本研究におけるウイルス個数は整数値ではなく任意単位で表示しているため、無限に小さい値をとりうる。そこで、本研究では(5)式に示すようじ、ウイルス個数が限界値未満となった時に、ウイルス個数はゼロになったものとみなし、この時点で感染者は新規回復者となると仮定する。限界値は virus releasing rate の定数倍とし、定数倍の値は 10^{-9} と設定した。

$$N_{VP}^i(t) = 0, \text{ if } N_{VP}^i(t) < N_{min}^i \quad (5)$$

where, N_{min}^i : $n_{limit} * \text{virus releasing rate} * \text{virus absorbing rate}$

n_{limit} : Critical value for zero viruses assumed as 10^{-9}

2.1.6 その他の仮定

本モデルでは死亡は無視する。死亡者の割合は感染者の割合に比べて大幅に少ないため、感染の拡大と収束の基本条件とは切りはなしてよち考える。また死亡者を考慮するためには膨大なエージェント数が必要となるため死亡を含むモデルは今後の課題とした。その結果、本モデルではウイルス個数が過大でない限り感染者は全員最終的には回復する。回復者は抗体有無によって抗体あり回復者と抗体なし回復者に分けられる。

感染者は回復後新たに感染者と遭遇すれば再度感染する。その場合、もし最初の感染によって抗体を獲得している場合には、2 度目以降の感染では感染直後から抗体を保有していると仮定す

る。

2.1.7 モデルに含まれる属性変数、パラメータ変数及び計算によって得られる特性変数

エージェントの属性変数およびパラメータ変数を表 1 に示す。表 1 において一様乱数で定義される変数はエージェント固有の変数である。またモデルにおいて計算される特性変数を表 2 に示す。これらの特性値は、各エージェントの属性値に関わる特性値（体内ウイルス個数、空間内位置座標、感染に関わる状態変数等）、及び人間ネットワークシステムの状態における特性値（新規感染者数、感染者数、新規回復者数等）で構成され、それぞれ各タイムステップ毎に計算される。

表 1 エージェントの属性変数およびパラメータ変数

Variables	Initial value or definition
Number of agents	2000
Area of network system	1000 × 1000
Maximum Distance of agent's move	100
Critical distance for infection	5
Initial number of the infected	1
Number of viruses hold by the infected initially	5000 × 100 (arbitrary unit)
Virus replication rate	1.4, 1.6, 1.8, 2.0
Virus attack rate by immune cells	0.3 ± 0.1 uniform random number
Virus attack rate by antibodies	0.5 ± 0.1 uniform random number
Virus-count multiple for antibody emergence	0.5 ± 0.2
Elapsed period after infection for antibody emergence	7 ± 2 uniform random number
Minimum-virus-count multiple for zero viruses	0.001*0.001*0.001 (arbitrary unit)
Virus releasing rate	0.1 ± 0.05 uniform random number
Virus absorbing rate	0.1 ± 0.05 uniform random number
Position (x,y) in the 2 dimentional space	defined at every step
Distance of agent's move	[0,maximum distance] uniform random number
Direction of agent's move	[0,2 π] uniform random number
Agent as an object in the neighbour	defined at every step
Number of viruses	calculated at every step

表 2 モデルにおいて計算されるミクロ及びマクロ特性変数

Variables related to individual's attribute	Variables related to the state of the network system
Number of viruses	Average number of neighbours per capita
Position in the 2 dimentioanal space	Number of the infected(% per capita)
Agents of nearest neighbour(Object)	Number of the newly infected(% per capita)
Number of viruses contaminated by infection	Number of the newly recovered(% per capita)
Infection-related state variables	Accumulated number of the infected(% per capita)
Uninfected	Accumulated number of the recovered(% per capita)
Infectious state with antibodies in operation	Number of the recovered with antibody(% per capita)
Infectious state with immune cells in operation	Number of the recovered without antibody(% per capita)
Recovered with antibody	Number of the infected with antibody(% capita)
Recovered without antibody	Number of the infected without antibody(% per capita)

2.2 計算方法

モデルは C++オブジェクト指向プログラミングによって自作した。主なクラスは、Human、Germ、Network である。各クラスの役割は以下のとおりである。それぞれのクラスはウイルス個数や感染状態に関連した変数を互いに参照する。

- ・ Human : 人間オブジェクトを表し 2 次元空間内を每期ランダムに動き回る。それぞれ固有の Germ オブジェクトを保有する。
- ・ Germ : ウイルス個数、免疫攻撃率、抗体攻撃率、感染状態変数等の属性変数を保有し、ウイルス関連変数の計算を受け持つ。
- ・ Network : Human の位置情報、及び Human 間の相互位置関係を管理し、エージェント間の感染に関わる計算を受け持つ。
- ・ HumanAggregator : Human オブジェクトの生成、および感染者数など感染に関わるマクロ変数の計算を受け持つ。

以上の他、ポリモルフィズムのための上位クラス (Agent、AgentAggregator)、乱数生成にかかわるクラス (RandomGenerator)、パラメータ及び入出力に関わるクラス (SimulatorConfig)、主要オブジェクトの生成とプログラム全体の進行を受け持つクラス (SimulatorApp) など、合計 9 個のクラスで構成される。

計算プロセスは以下の通りである。フローチャートを図 1 に示す。

- パラメータ値の読み込み
- 各種クラスオブジェクトの生成と変数初期値の設定
- 以下のステップを最大繰り返し回数まで繰り返す。
 - 以下を各エージェントについて繰り返す。エージェント順番はランダムシャッフルする。
 - 各エージェントの位置座標の更新
 - 近接エージェント (neighbor) の特定
 - ウイルス関連変数の更新
 - 各エージェントの属性変数のプリントアウト
 - 感染に関連したマクロ特性値の計算とプリントアウト

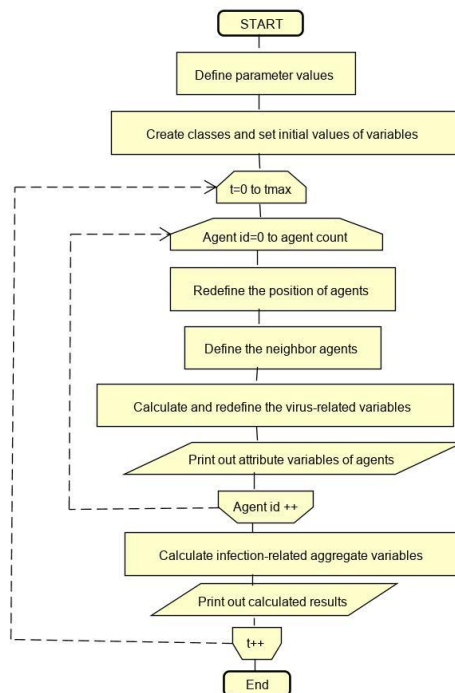


図 1 計算手順のフローチャート

3. 実験条件

1) 解析項目（各ステップ毎）

感染者数人口比、新規感染者数人口比、新規回復者人口比（抗体保持有無）
各エージェントの遭遇 Human オブジェクト、一人当たり平均遭遇感染者数、
各エージェントの体内ウイルスの数、感染と回復に関わる状態変数

2) 実験条件

上記に及ぼす下記項目の影響

- ・ウイルス増殖率の影響
- ・最大行動距離の影響
- ・ウイルス吸収率（マスク効果等）の影響
- ・行動制限及びその後の制限解除の影響

3) パラメータ（表1 参照）

- ・エージェント数：2000 人、行動範囲：1000×1000、接触判定限界距離：5.0
- ・初期感染者：1 人、保有ウイルス 5000*100
- ・ウイルス増殖率：1.4,1.6,1.8,2.0
- ・自然免疫によるウイルス攻撃率 0.3 ± 0.1 の一様乱数、エージェント固有
- ・抗体によるウイルス攻撃率 0.5 ± 0.1 の一様乱数、エージェント固有
- ・抗体発生までの限界ステップ数 7 ± 2 の一様乱数、エージェント固有
- ・ウイルス放出率、吸収率 0.1 ± 0.05 の一様乱数、エージェント固有
- ・ゼロとみなす最小ウイルス個数 $10^{-9} \times 0.1 \times 0.1$

4. 実験結果

4.1 感染と治癒の基本挙動

4.1.1 各エージェントのウイルス個数の挙動

本モデルでは各タイムステップ毎に各エージェントのウイルス個数（任意単位）の変化を計算できる。図2に感染者一人の状態から複数のエージェントに感染が伝搬する様子の計算例を示す。図2において Agent1 は初期条件における感染者である。Agent 13 は Agent1 からタイムステップ4に最初に感染したエージェントである。図には表示していないが、次に Agent1 から感染するのは Agent 155 であり、その時期はタイムステップ25である。しかし Agent 155 が感染する前に、Agent 13 が Agent 1373 をタイムステップ6の時点で感染させ、Agent 1373 が Agent 1019 を感染させ、Agent 1019 が Agent 1911 を感染させている。このように本モデルでは Agent 単位で感染伝播の様子を追跡できる。回復過程も同様である。

図2において、感染直後のウイルス個数変化は Agent 1,13,1019 では増加し、Agent 1911 では減少している。ウイルス個数が増加するか減少するかは免疫によるウイルス攻撃による減少とウイルス増殖による個数増加の大小関係に依存している。すなわち免疫力の高い個人はウイルス攻撃率が大きく、ウイルス個数は感染の初期から減少するが、一方免疫力が低い個人ではウイルス個数は増加する。また感染から一定期間経過した後はウイルス個数変化の勾配はすべて負となりすべてのエージェントにおいてウイルス個数は時間経過とともに減少傾向となっている。これは抗体が発生しそれによるウイルス攻撃率が自然免疫に比べて大きいことによる。ただし、ウイル

ス攻撃率は個人によって異なるためウイルス個数変化の勾配は個人によって異なっている。

本モデルでは感染の拡大と収束の過程において、エージェントは複数回感染しうる。その理由は、本モデルにおいて感染は感染者との遭遇のみによって発生すると仮定しておりそれ以外の人為的仮定はおいていないためである。図3に複数回感染の例を示す。図において Agent 1556 は3回感染し、その内2回はウイルス個数減少速度が途中で大きくなっている。これは抗体発生によるものである。一方 Agent 613 ではウイルス個数は滑らかに減少している。これは Agent 613 は抗体発生に至らずに自然免疫のみで回復に至っていることを示している。抗体が発生するか否かは、(3)式に示すように、感染時のウイルス個数、エージェント固有の抗体発生限界期間、及び自然免疫のウイルス攻撃率の大きさに依存する。

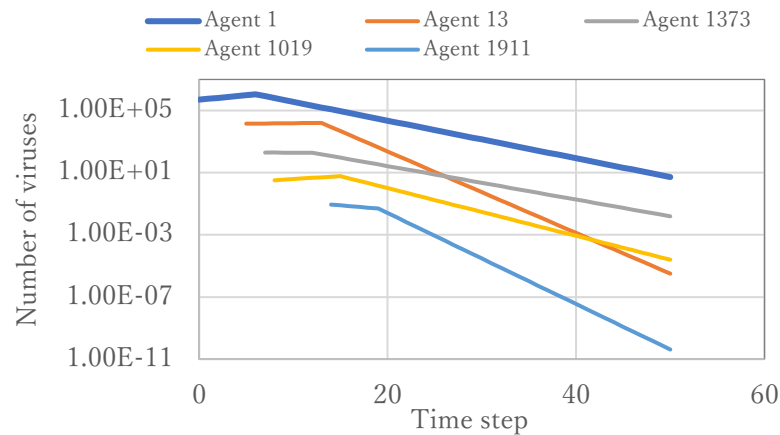


図2 感染伝播初期の各エージェントのウイルス個数の変化、感染伝播がいかんして進行していくかの例を示す。(ウイルス増殖率 1.8、最大行動距離 100)

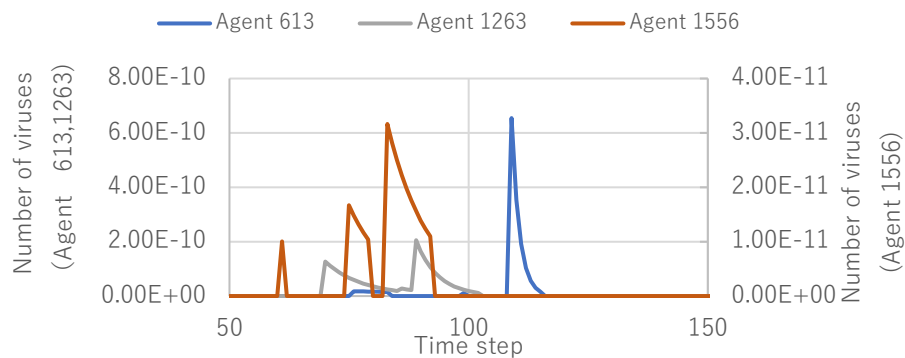


図3 複数回感染エージェントにおけるウイルス個数変化の例（解析条件は図2と同一）

図4及び図5に感染拡大から収束に至る過程におけるウイルス個数（図4）と回復に要する期間（図5）の挙動を示す。図4に示すように感染時に感染者から健常者に移転されるウイルス個数は感染時期が経過するほど減少する。これは感染プロセスにおいて、感染者から健常者に移転されるウイルス数は感染者が保有するウイルス数の一部に過ぎないこと、すなわちウイルス放出率（virus releasing rate）およびウイルス吸収率（virus absorbing rate）の効果によるもの、及び感染者自身が保有するウイルス数が抗体を含む免疫効果によって時間経過とともに低下するためである。また図5に示すように、感染時のウイルス個数が少ないほど回復に要する期間は短くなる。

このことは、感染の拡大と収束の過程で、時間経過とともに回復に要する期間は短くなることを示している。

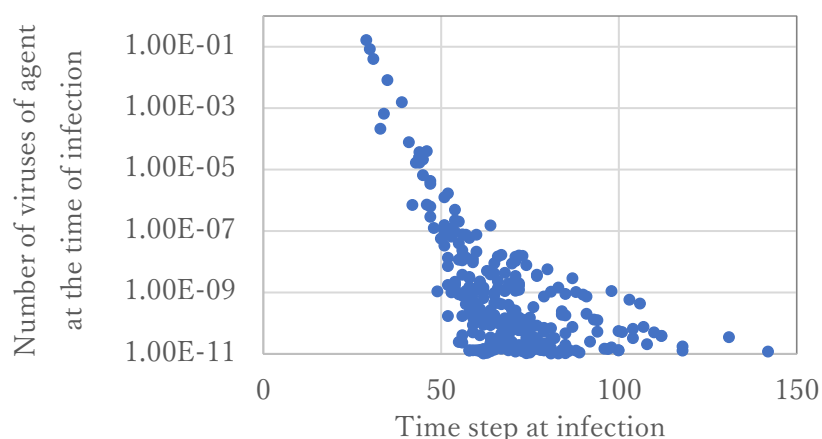


図4 感染拡大と収束の過程における感染時点でのウイルス個数と感染時期の関係
(ウイルス増殖率 1.6、最大移動距離 100)

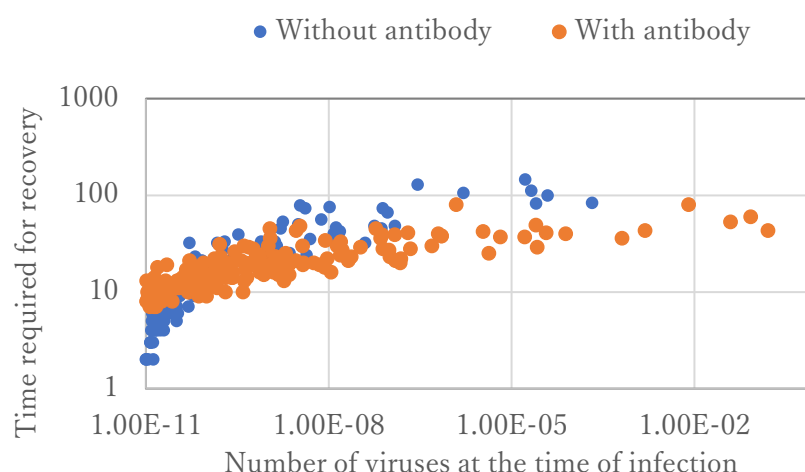


図5 感染から回復までに要する期間と感染時ウイルス個数との関係
(ウイルス増殖率 1.6、最大移動距離 100)

4.1.2 感染者数及び回復者数に及ぼすウイルス増殖率の影響

本節では人々の移動制限やマスク着用などの感染防止策を取らない自然の感染拡大と収束の挙動の計算結果について述べる。

各期における感染者数人口比の変化を図1に示す。免疫および抗体によるウイルス排除率を一定とした場合、感染者数は図6に示すように、ウイルス増殖率に大きく依存し、免疫・抗体によるウイルス排除率に比べてウイルス増殖率が大きくなると感染者数は増加しピークを示した後に減少してパンデミックは収束する。一方ウイルス増殖率が大きすぎると図6のウイルス増殖率 2.0 のケースに見られるように、全員が感染者となり回復者は出現しないのでパンデミックは収束しない。一方、免疫及び抗体によるウイルス排除率に比べてウイルス増殖率が小さすぎると、感染

伝播はごく小規模な人数にとどまり早期に収束する。実社会ではパンデミックは遅かれ早かれ収束しかつ感染拡大はパンデミックと呼ばれるほどに大規模となるので、本研究の実験条件の範囲内では、図6のウイルス増殖率1.4~1.8のケースが定性的に実現現象を再現したケースといえる。以下ではウイルス増殖率1.4,1.6,1.8のケースについて、感染者増加と回復者増加の基本挙動の計算結果を示す。

図7より、初期には一人であった感染者数が時間経過と共に急激に増加しピークに達した後減少する傾向がボトムアップな人と人の相互作用の結果として再現されている。また図8に示すように回復者数は、新規感染者数の増加に遅れて増加しピークに達した後減少する。また図7及び図8において、ピーク時の感染者及び回復者の数はウイルス増殖率が大ほど大きい。

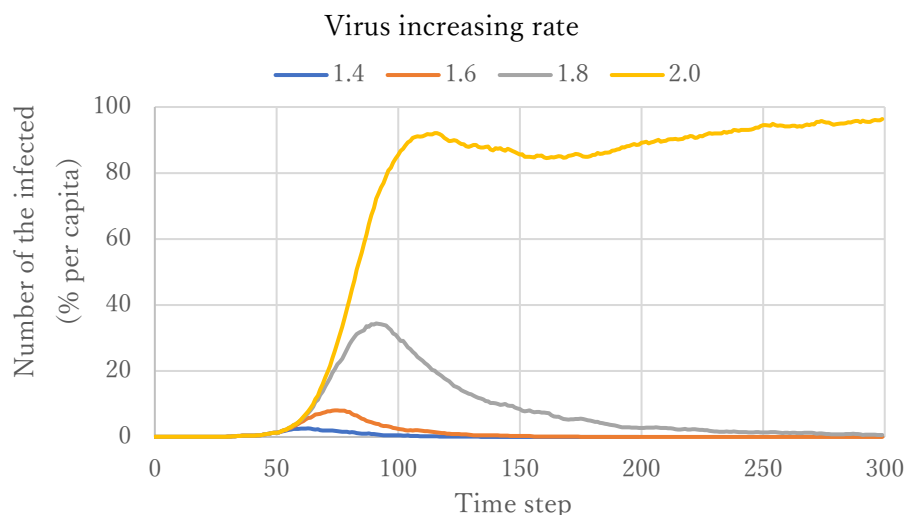


図6 感染者数人口比に及ぼすウイルス増殖率の影響

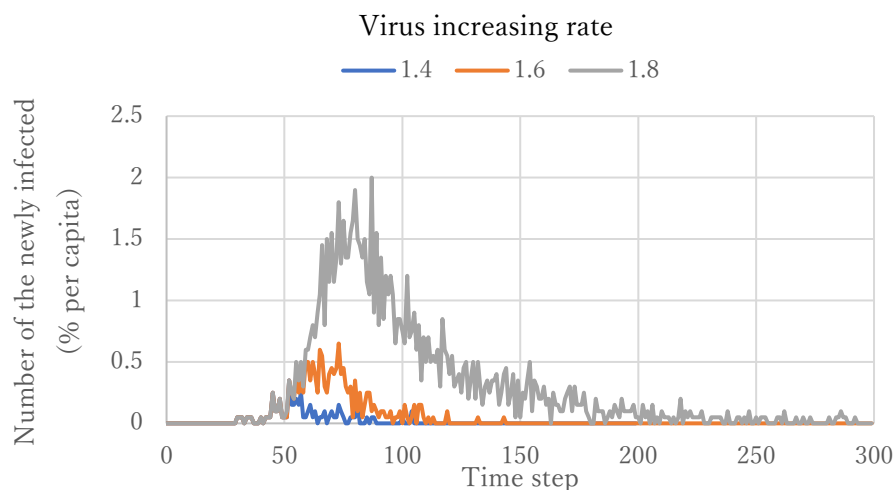


図7 新規感染者数人口比に及ぼすウイルス増殖率の影響

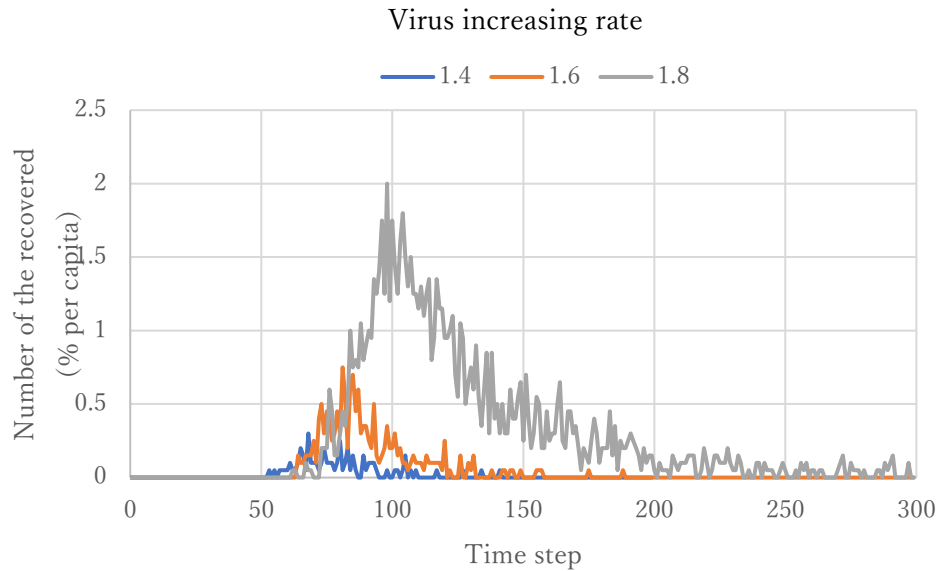


図8 回復者人口比に及ぼすウイルス増殖率の影響

4.1.3 新規感染者数、新規回復者数、及び感染者数の相互の関係

図9にウイルス増殖率1.8のケースを例にとって、新規感染者数、新規回復者数、および感染者数の継時変化の相互の時期的関係を示す。新規感染者数の増加に遅れて新規回復者数が増加し、両者のピークの中間的時期に感染者数（ある時期における感染者数の合計値）がピーク値を示している。

図10は新規感染者数と新規回復者数の差および感染者数の継時変化を示す。図9及び図10から明らかなように、感染者数がピークを示す時期は、新規感染者数が新規回復者数と一致する時点であることがわかる。このことは、感染者数の定義式より自明であるといえる。即ち、感染者数の定義は（6）式で与えられ、本モデルでは死亡を無視しているので、感染者数は前期末感染者数+新規感染者数-新規回復者数であり、新規感染者数が新規回復者数と等しい時に感染者数は最大値を示すことが明らかである。

感染者数がピークを示す時期が新規感染者数と新規回復者数とが一致する時点であることは、感染が収束する基本メカニズムが、回復者数の増加によるものであることを示唆している。また図11に示すように、感染者がピークを示す時期は累積感染者数が増加中時期の中間的時期に位置していることも1つの特徴である。

$$N_{infected}^{t+1} = N_{infected}^t + N_{newly infected}^t - N_{newly recovered}^t - N_{newly dead}^t \quad (6)$$

where, $N_{infected}$: Number of the infected

$N_{newly infected}$: Number of the newly infected

$N_{Newly dead}$: Number of the newly dead

t : period

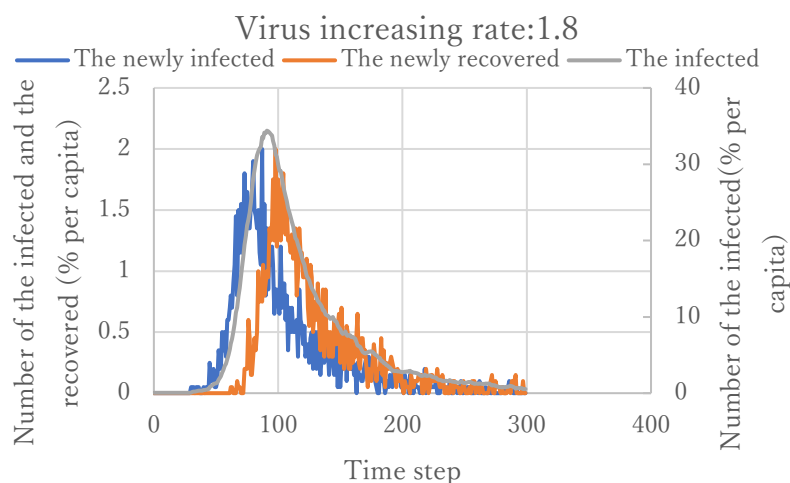


図 9 新規感染者数、新規回復者数、及び感染者数の変化と相互の時期的関係

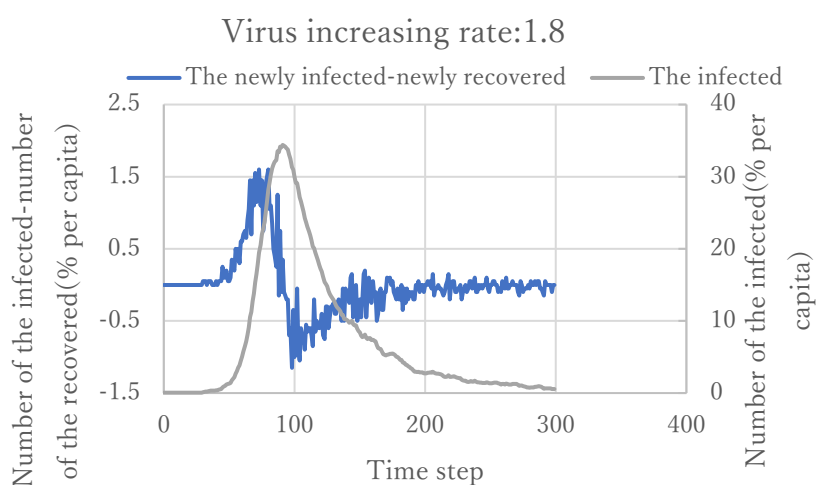


図 10 感染者数と新規感染者マイナス新規回復者数の比較

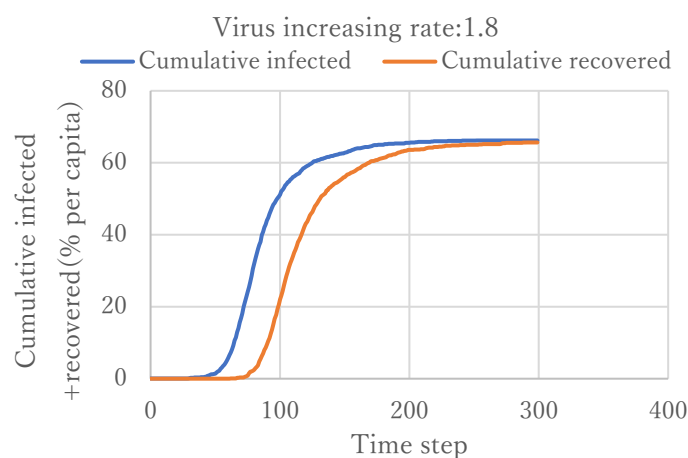


図 11 累積感染者数および累積回復者数の推移

4.1.4 回復者に占める抗体保持者の割合

図 12 及び図 13 に、ウイルス増殖率 1.6 と 1.4 の場合を例にとって、抗体保持回復者数、抗体なし回復者数、および累積感染者数の経時変化を示す。なお本モデルでは死亡を考慮していない

ため、感染者の全員が最終的に回復する。その際抗体をもって回復するか抗体発生に至らずに自然免疫のみで回復するかはウイルス増殖率に依存する。

図 12 に示すように、ウイルス増殖率が 1.6 のケースでは回復者の 2/3 は抗体をもって回復する。また図 13 に示すように、ウイルス増殖率が 1.4 と相対的に小さい場合には回復者の 2/3 は抗体を持たずに回復している。即ち、抗体をもって回復する人の割合はウイルス増殖率が小さいほど少なくなる。

これらの結果は、パンデミックの収束において抗体保持者が多数を示すことは必須要件でないことを示唆している。

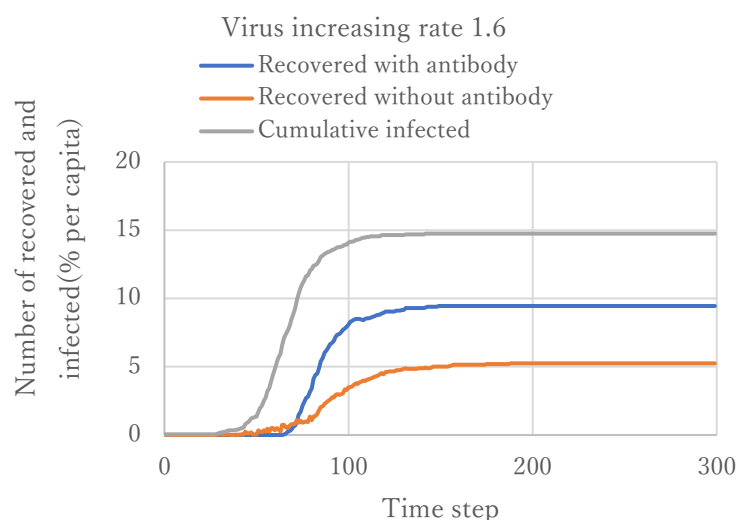


図 12 抗体有無回復者と累積感染者数の変化（ウイルス増殖率 1.6）

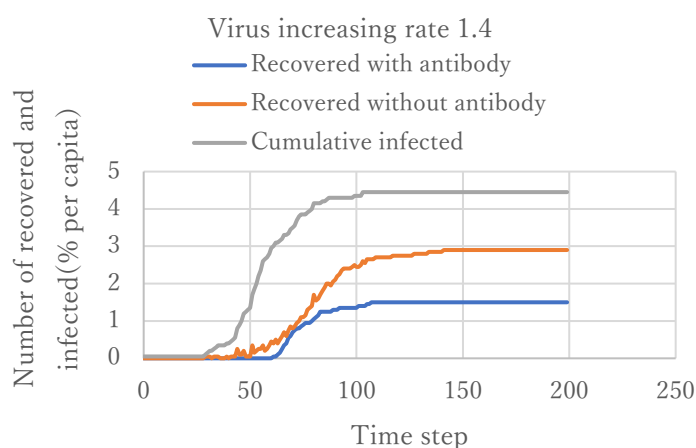


図 13 抗体有無回復者と累積感染者数の変化（ウイルス増殖率 1.4）

4.1.5 遭遇感染者数に及ぼすウイルス増殖率の影響

本モデルでは、互いに 5 m以内に遭遇した人を遭遇者と定義し、遭遇者の内感染している者を遭遇感染者と呼ぶ。

図 14、図 15 はそれぞれ一人当たり平均遭遇感染者数、及び遭遇感染者の割合に及ぼすウイルス増殖率の影響である。ウイルス増殖率が大ほど遭遇感染者数は大きくなる。また遭遇感染者数

の継時変化は感染者数及び新規感染者数の継時変化（図 6、図 7）と極めて類似していることが分かる。

図 16 に示すように一人当たり平均遭遇感染者数は感染者数と極めて良い相関関係を示している。また図 17 に示すように、新規感染者数も一人当たり平均遭遇感染者数と相関関係がある。図 17 においてばらつきの主な原因は感染拡大時と感染収束時で未感染者数（回復者数を含む）に大きな差異があること等によるものと考えられ詳細は今後の課題である。このことから感染拡大の主原因は未感染者が感染者と遭遇することにあることがわかる。即ち、未感染者が感染者と遭遇することによって感染者数が増加し、そのことが未感染者が感染者と遭遇する確率を増やし、新規感染者の増加をもたらす、ことが感染拡大の基本メカニズムであると言える。

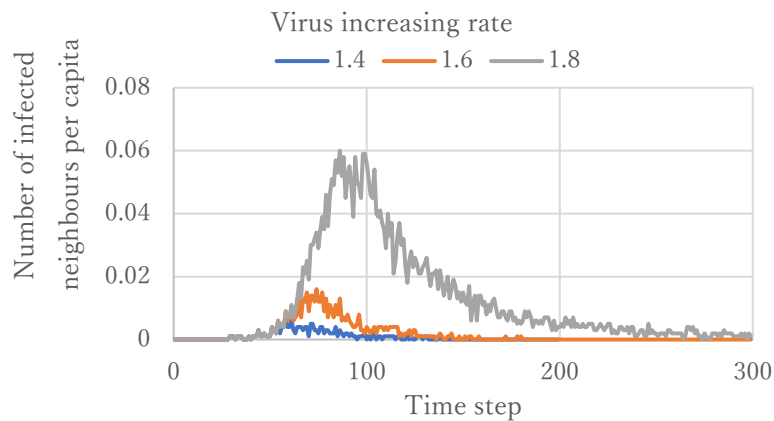


図 14 一人当たり平均遭遇感染者数に及ぼすウイルス増殖率の影響

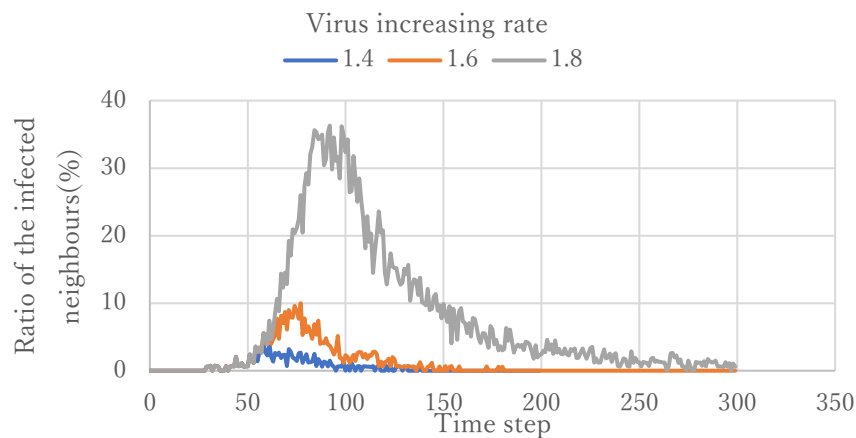


図 15 遭遇者中の感染者割合に及ぼすウイルス増殖率の影響

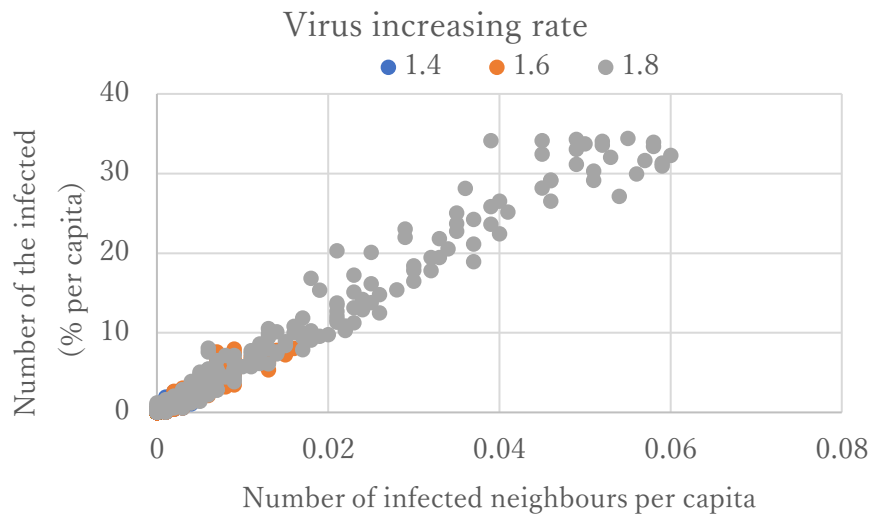


図 16 一人当たり平均遭遇感染者数と感染者数人口比との関係

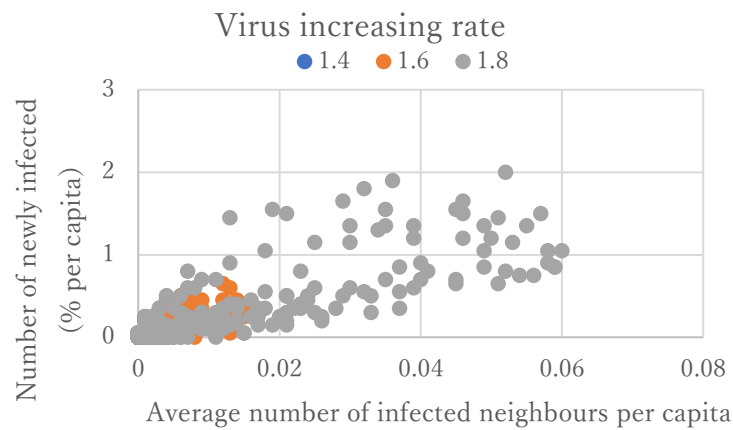


図 17 一人当たり遭遇感染者数と新規感染者数の関係

4.1.6 感染者数に及ぼす最大移動距離の影響

本モデルでは人々の移動は方向と距離共にランダムと仮定しているので、感染者との遭遇確率は最大移動距離に依存する。

前節までの計算結果は最大移動距離を 100 とした場合のものである。以下に最大移動距離を 2 倍に増加した場合の計算結果を最大移動距離 100 の場合と比較して示す。

図 18, 図 19 に感染者数および新規感染者数に及ぼす最大移動距離の影響を示す。両特性値とも最大移動距離を大きくすると明らかに高い値となっている。また図 20 に一人当たり遭遇平均感染者数に及ぼす最大移動距離の影響を示す。図 20 に示す挙動は図 18 の挙動と類似しており、感染者数が増加すると一人当たり遭遇平均感染者数が増加し、そのことが新たな感染者の増加をもたらしているといえる。即ち感染者数平均移動距離が大ほど大きいのは平均移動距離が大きいほど健常者が感染者と遭遇する頻度が増加することによる。また図 21 に示すように最大移動距離を大きくすると抗体保持後に回復する人の数が増加する。

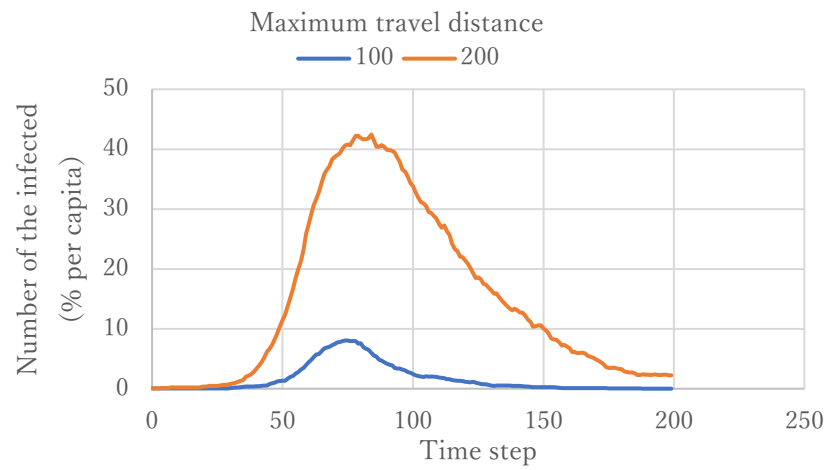


図 18 感染者数に及ぼす最大移動距離の影響（ウイルス増殖率 1.6）

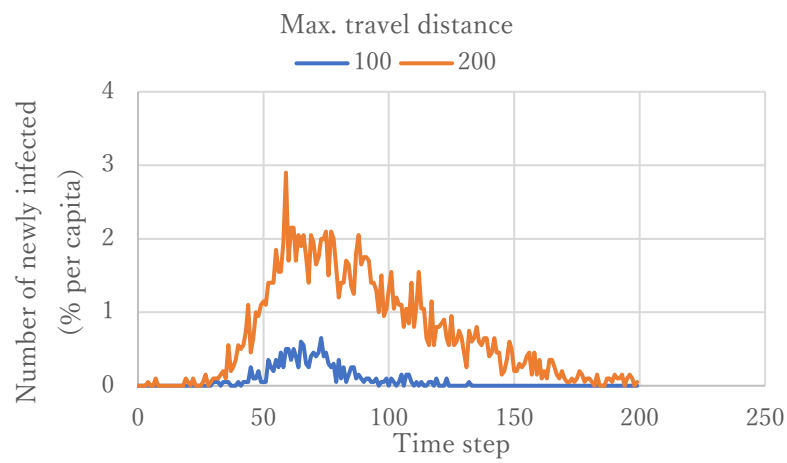


図 19 新規感染者数に及ぼす最大移動距離の影響（ウイルス増殖率 1.6）

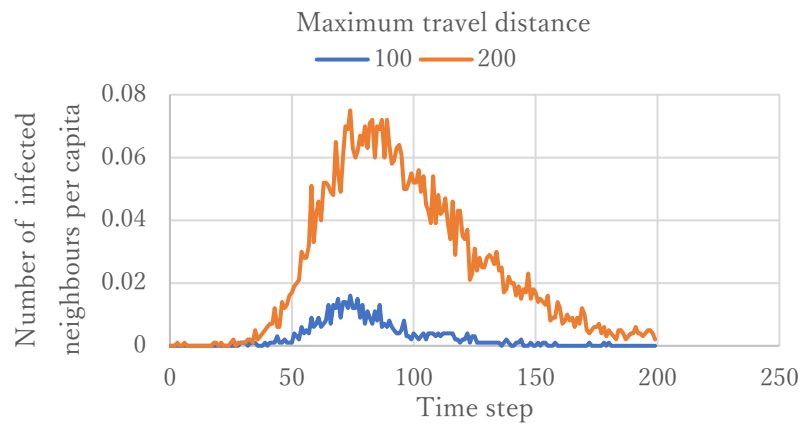


図 20 一人当たり遭遇感染者数に及ぼす最大移動距離の影響（ウイルス増殖率 1.6）

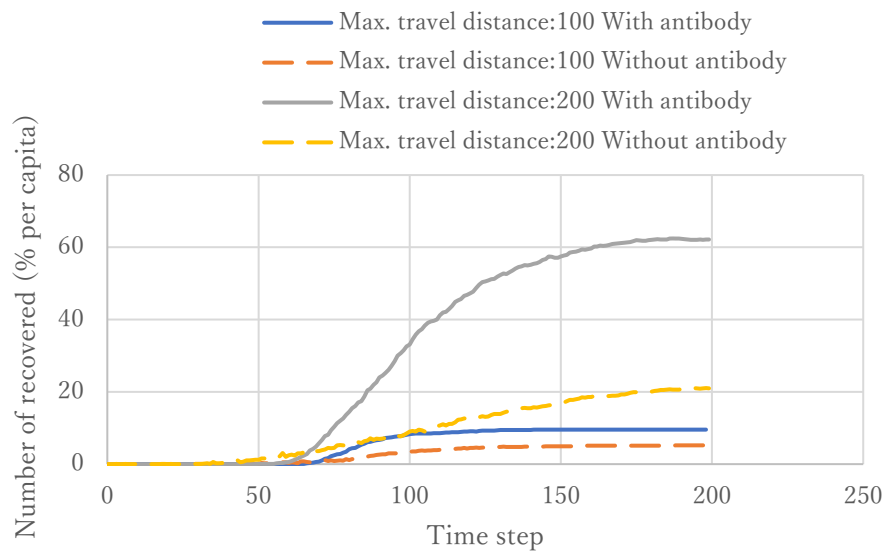


図 21 抗体保持者人口比に及ぼす最大移動距離の影響（ウイルス増殖率 1.6）

4.1.7 感染者数に及ぼすウイルス吸収率の影響

本モデルにおけるウイルス吸収率とはウイルス保持者から放出されたウイルスの内感染によって感染者に吸収されるウイルスの割合を表す（2.1 参照）。

図 22 に感染者人口比に及ぼす吸収率の影響を示す。吸収率低下によって感染者数は大幅に低減している。このことから、マスク着用はウイルス吸収率を低下させる手段となり感染によって混入するウイルス量の低減に有効と想定される。

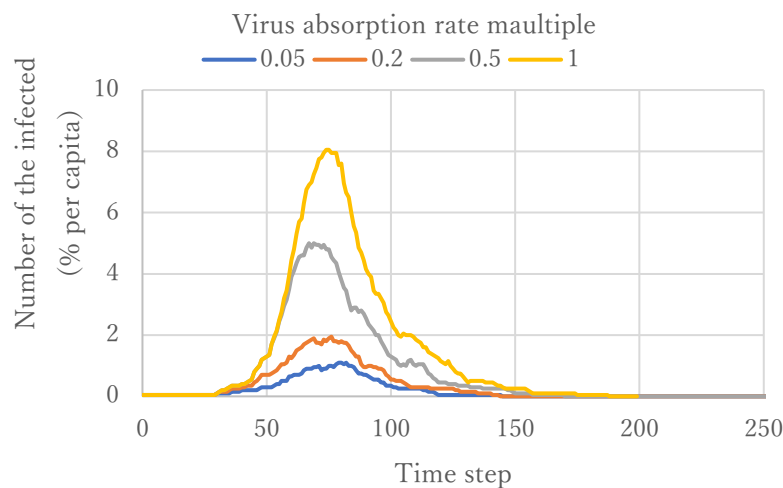


図 22 感染者人口比に及ぼすウイルス吸収率の影響

4.2 実データとの比較

図 23 に日本における新規感染者数と新規回復者数の推移を、また図 24 に感染者数の推移[17]を示す。図 23 より新規感染者数のピークは 4 月 15 日頃であり、回復者数のピークは 5 月 10 日頃、そして両者がほぼ同じとなる時期は 4 月 30 日頃であることが読み取れる。更に図 18 より感染者数

のピークは4月30日頃である。

このように、新規回復者数のピークは新規感染者数のピークに遅れて出現し、感染者数のピークは新規感染者数と新規回復者数がほぼ同数となる時期に一致していることがわかる。この傾向は図9,図10に示した計算結果の傾向と定性的に一致している。即ち本モデルにおける計算結果は実システムにおける感染者及び回復者の基本挙動を定性的に再現していることがわかる。

また累積感染者数の推移[17]を図25に示す。感染者数がピークを示す4月30日頃は累積感染者数が増加中の時期であり、図11に示す本モデルの計算結果の傾向と定性的に一致している。

Newly Infected vs. Newly Recovered in Japan

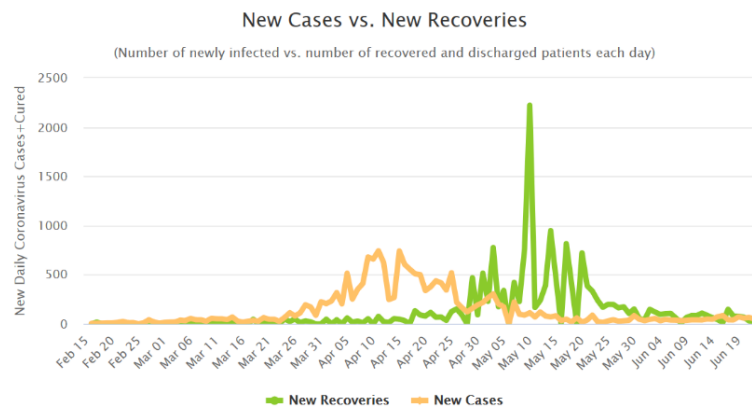


図 23 日本における新規感染者数および新規回復者数の推移(2020年6月20日時点)¹⁷⁾

Active Cases in Japan

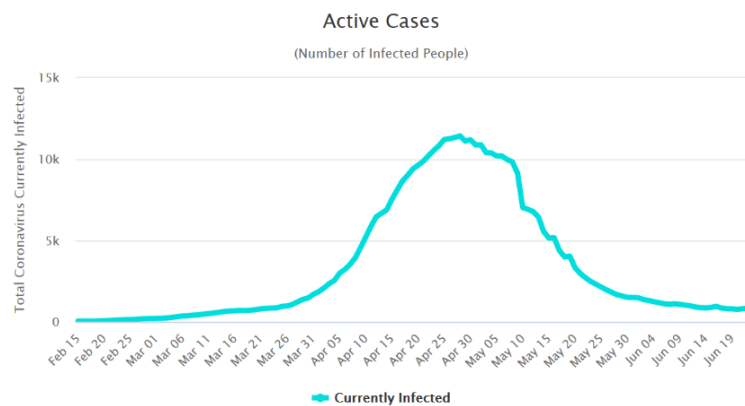
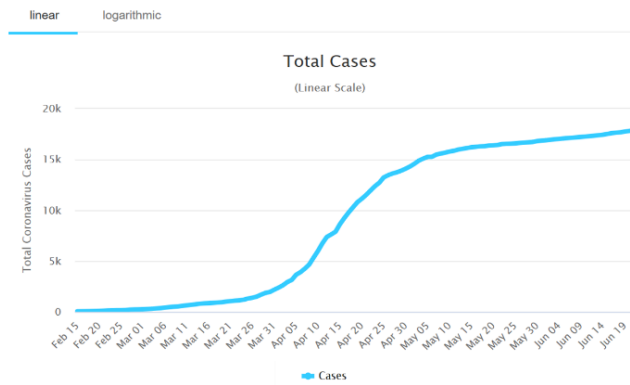


図 24 日本における感染者数の推移(2020年6月20日時点)¹⁷⁾

Total Coronavirus Cases in Japan

図 25 日本における累積感染者数の推移(2020 年 6 月 20 日時点)¹⁷⁾

4.3 移動制限と解除及びウイルス吸収率の影響

4.3.1 移動制限と解除の影響

図 26 に 50 期から 100 期の間最大移動距離を 0.2 倍および 0.1 倍に制限し、100 期以降はそれを解除した場合の新規感染者推移と基本条件の場合の推移と比較して示す。最大移動距離を 0.2 倍に制限することによって、新規感染者のピーク値は大幅に低下するが、制限解除後は再び新規感染者が増加している。即ち第 2 波が生じている。一方、最大移動距離を 0.1 倍に制限し 100 期以降それを解除した場合には第 2 波の出現は顕著ではない。

同様の傾向は図 27 おび図 28 に示すように平均遭遇感染者数及び感染者数にも表れている。即ち、最大移動距離を 0.2 倍にした後に移動制限を解除した場合に第 2 波が生じ、0.1 倍に規制した後に移動制限を解除した場合には第 2 波の出現が顕著ではない理由は、0.1 倍に制限した場合の方が移動制限解除直前の残留感染者数が少なく、その結果感染者との遭遇確率が低下するためといえる。

なお、図 29 に抗体保持回復者数に及ぼす行動制限と解除の影響を示すが、抗体保持回復者数は移動制限を厳しく行うほど少なくなっており、第 2 波の出現に対して抗体保持者の割合は少なくとも主な支配要因ではない。

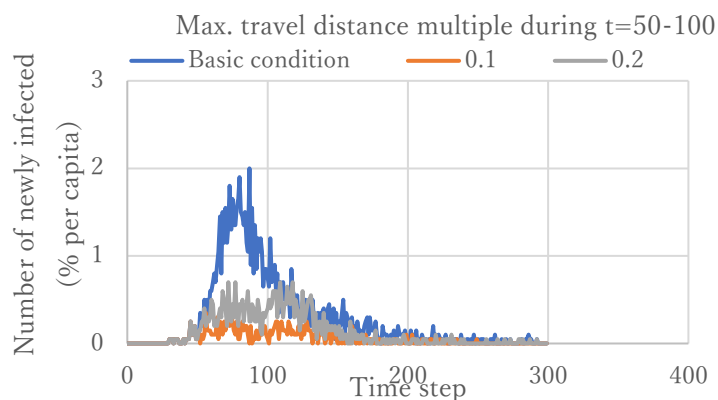


図 26 一次的な行動制限と制限解除の影響（ウイルス増殖率 1.8）

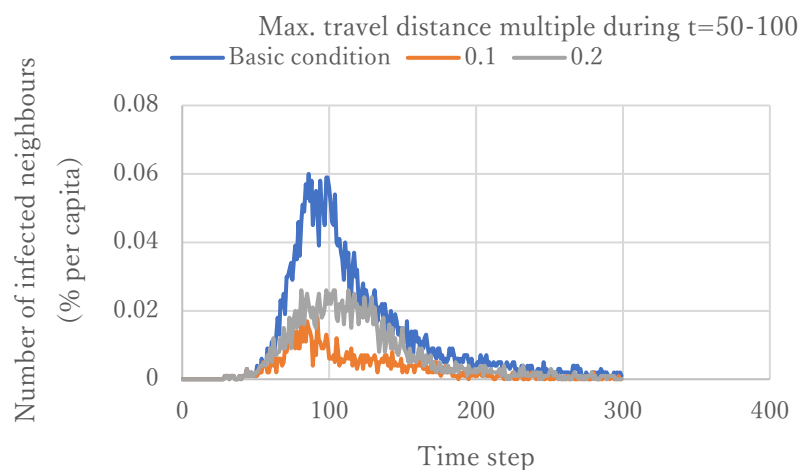


図 27 平均遭遇感染者数に及ぼす行動制限と解除の影響（ウイルス増殖率 1.8）

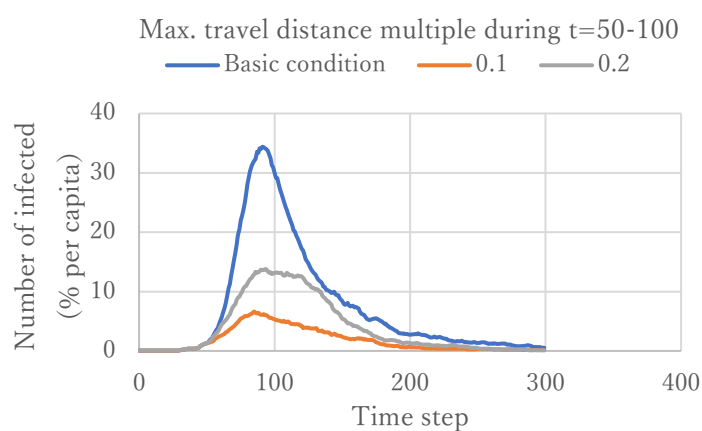


図 28 感染者数に及ぼす行動制限と解除の影響（ウイルス増殖率 1.8）

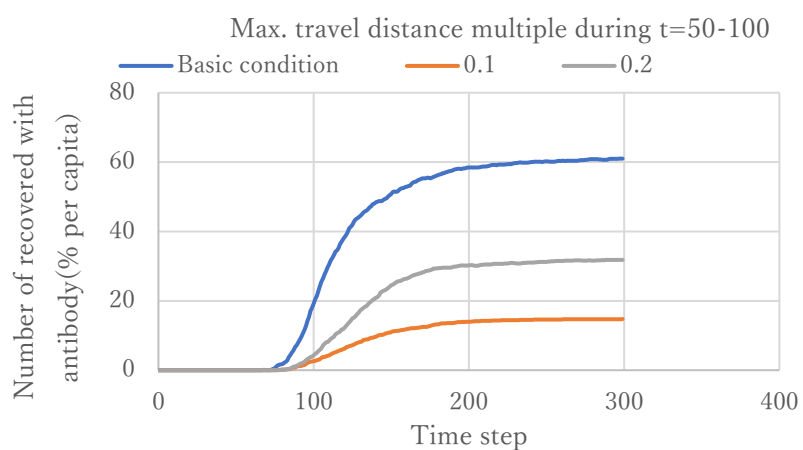


図 29 抗体保持回復者数に及ぼす行動制限と解除の影響（ウイルス増殖率 1.8）

4.3.2 移動制限と解除に関わる感染挙動に及ぼすウイルス吸収率の影響

本節では移動制限解除後の感染挙動に及ぼすウイルス吸収率の影響について述べる。

図 30 は期間を $t=0-50, 50-100$ 及び $t>100$ の 3 区間に分けて、各期間のウイルス吸収率を変更させた場合の感染者数の比較を示す。即ち、符合 1-1-1、1-0.2-1、1-0.2-0.2 はそれぞれ、吸収率を全区間基準値とした場合、 $t=50-100$ 期のみ基準値の 0.2 倍とした場合、及び $t>50$ の 2 区間について基準値の 0.2 倍とした場合の新規感染者数推移を示す。また図 24 における基本条件は移動制限を行わずかつウイルス吸収率も基準値のままのケースである。

図 30 に見られるように、吸収率が 1-1-1 と基準値のままの場合、 $t=100$ 以降最大移動距離制限を解除することによって新規感染者が再び増加していること、即ち感染の第 2 波が生じていることがわかる。これに対して吸収率を 1-0.2-1 とした場合第 2 波の発生は大幅に緩和されているが、 $t>100$ においてわずかながら新規感染者の再増加が起こっている。

これに対して 1-0.2-0.2 の場合には、移動制限解除に伴う新規感染者の再増加は起こっていない。図 31 は感染者数推移に関する同様の比較である。移動制限解除後の感染者数の再増加傾向は新規感染者数ほどに顕著ではないが、1-0.2-0.2 のケースと比べれば、移動制限解除後の感染者数の低減は顕著ではない。

図 32 に示すように、遭遇感染者数人口比の変化は図 30 に見られる新規感染者数の変化と極めて類似した傾向を示している。このことから図 30 に見られる感染者数再増加傾向に及ぼす吸収率の影響は、吸収率低下によって新規回復者数が増加し健常者が感染者と遭遇する確率が低下したためといえる。

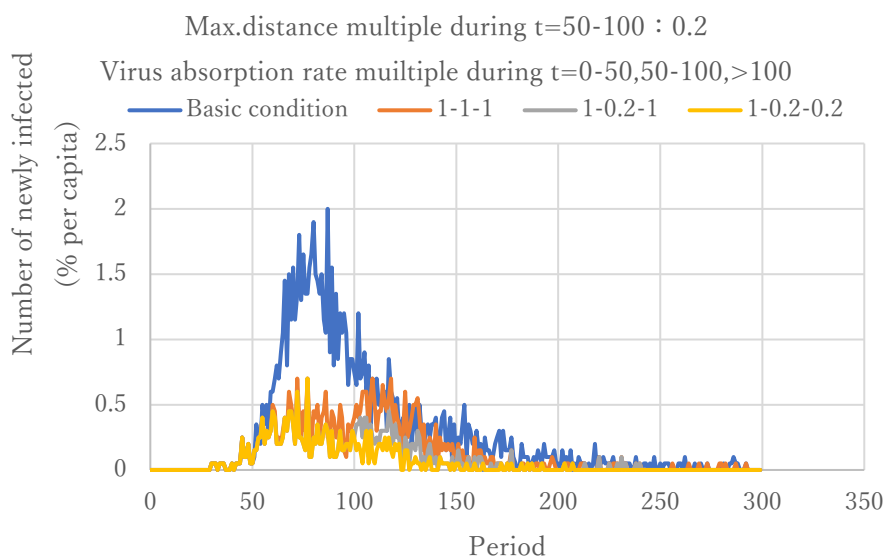


図 30 移動制限と解除の効果に及ぼすウイルス吸収率の影響

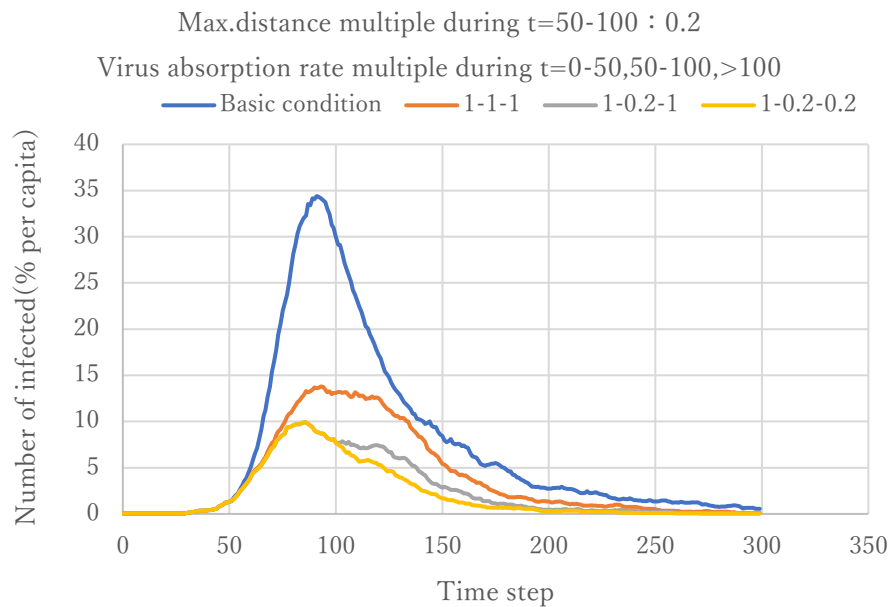


図 31 移動制限と解除後の感染者数に及ぼすウイルス吸収率の影響

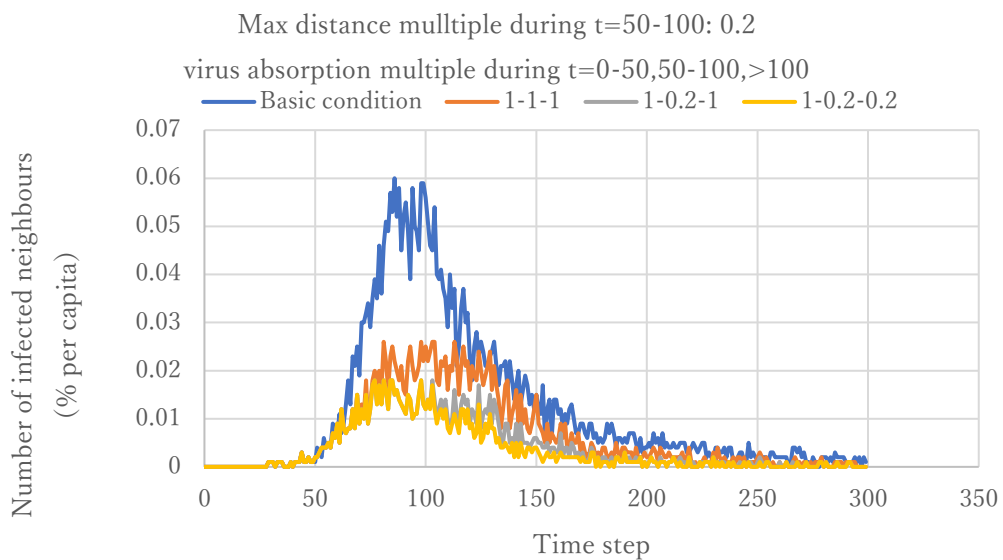


図 32 移動制限と解除後の遭遇感染者数人口比に及ぼすウイルス吸収率の影響

4.4 抗体発生なしの場合の感染拡大と収束の傾向

図 33 に抗体発生がない場合の新規感染者、新規回復者、および感染者の推移を示す。抗体なしの場合でも図 9 に示したものと類似の傾向がみられることが注目される。このことから、感染拡大が収束するメカニズムは、回復者の増加によるものであるといえる。即ち、初期に一人であった感染者が健常者と遭遇することによって健常者が感染者となり、この繰り返しによって健常者が感染者と遭遇する確率が累進的に増加するため、感染者数も累進的に増加する。一方感染者数増加の過程で一部の感染者は回復し、回復者の数は時間の経過とともに

増加する。その結果、健常者が感染者と接触する確率は低下するため新規感染者数が低減し、感染者数がゼロとなった時点でパンデミックは収束する。

但し、図 33 におけるウイルス増殖率は 1.3 であり、抗体ありの場合の 1.8（図 9 参照）に比べて大幅に小さい。すなわち、抗体発生なしの場合、感染拡大と収束を再現するために必要なウイルス増殖率は、抗体ありの場合に比べて大幅に低下する。実現象では、ウイルス増殖率はウイルス固有の一定値と考えられ、自然免疫のみでは自然治癒しないケースにおいて抗体が生成し、それによってウイルス攻撃力が増加して、自然治癒に至っているものと推定される。

このことから感染拡大と収束の基本メカニズムに対しては抗体の有無は本質的差異を持つものではないが、感染収束を安定的に実現するためには抗体生成の機能が有効に作用しているものと考えられる。但し、回復者の中に占める抗体保持者の割合は 100%である必要はなく、ウイルス増殖率と抗体によるウイルス排除率のバランスによっては図 12,図 13 の例にみられるように抗体保持回復者の全人口に占める割合は数%であっても感染拡大は収束し得ることが注目される。

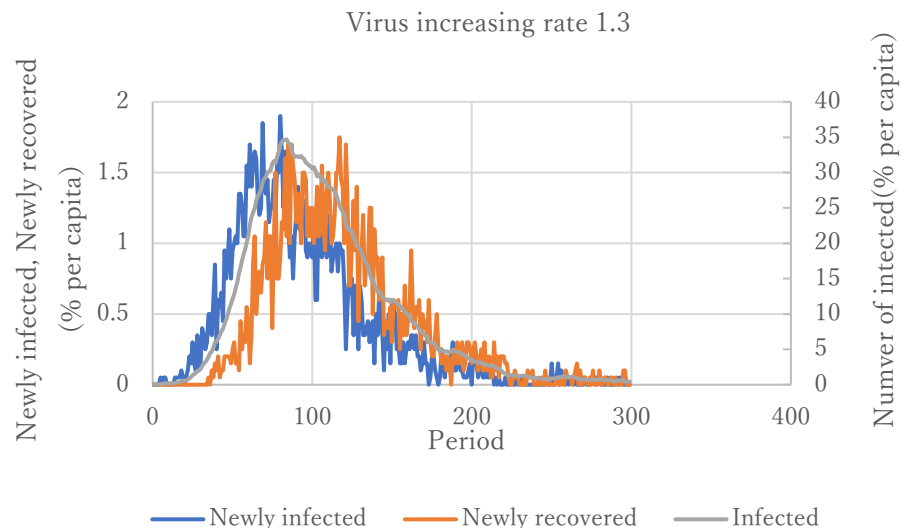


図 33 抗体発生なしを仮定した自然免疫のみの場合の感染拡大と収束の計算例

5. 考察 感染の拡大・収束の基本メカニズムと感染拡大防止策の提案

5.1 感染拡大収束の基本メカニズム

感染拡大収束に関わる基本特性は、新規感染者数、新規回復者数、及び感染者数である。4.1.2 で述べたように、これらの特性値は互いに関連しており、各特性値がピークを示す時期は、新規感染者数、感染者数、新規回復者数の順になっており、かつ感染者数がピークを示す時期は新規感染者数と新規回復者数がほぼ等しくなる時点である。またこの傾向は図 33 に示したように、抗体発生なしを仮定したケースにおいても変わらない。また 4.1.4 に示したように、感染者数及び新規感染者数の推移と健常者が遭遇する平均感染者数の推移とは酷似しており、かつ両特性値の間には相関がある。

これらのことから感染拡大と収束のメカニズムは次のように考えられる。

ある集団において、初期の感染者が一人であったとしても、その感染者と健常者が共に社会の中で動き回れば、両者が数 m 以内接触することは必然である。感染ルートには飛沫感染と接触感染があるが、いずれの場合も健常者が感染者と近接した場所にいれば咳や会話などによって感染者から放出されたウイルスの一部は健常者の体内に取り込まれる。即ち健常者の感染をもたらす。こうして感染者数が2倍に増えれば健常者が感染者と遭遇する確率も2倍となり、感染者数は累進的に増加する。一方、感染拡大の過程で初期の感染者の中には回復者が出現し、その数は時間の経過とともに増加する。回復者数の増加は健常者が感染者と遭遇する確率を相対的に低下させるため、新規感染者数の増加速度は鈍化し、いずれかの時点で新規感染者数はピーク値を示し、その後回復者数の増加に伴い低減する。

即ち、感染拡大の基本メカニズムは感染者との遭遇確率の累進的増加であり、感染拡大が収束する基本メカニズムは回復者数の増加に伴う感染者との遭遇確率の低下である、といえる。この基本メカニズムにおいて抗体の存在有無は無関係である。しかし抗体の存在は感染者数の中で早期に回復する人の増加をもたらすため、健常者が感染者と遭遇する確率の低位安定化には寄与するものと考えられる。このことから抗体の存在は、感染拡大収束の状態を安定化させる機能を有していると考えられる。

5.2 感染拡大収束の過程におけるウイルス個数の挙動

図4に示したように感染伝播の進行とともに感染時に体内に混入するウイルス数は低下する。また図5に示すように感染時のウイルス数が低下するほど回復に要する期間は短くなる。以下にこのことの理由と意味するところについて考察する。

まず図4の傾向が起こるのは、前述したように、感染者から健常者に移転されるウイルスは感染者の保有するウイルス数の一部であること、及び感染者の保有するウイルス数は免疫効果によって時間経過とともに低下するためである。この効果によって、閉じた系では感染伝播の影響は時間経過とともに低下し一方回復者数は増加するため、パンデミックは自立的に収束する。またこの効果によって、行動制限後の制限解除などによって感染者の再増加（第2波）が起こったとしても、感染者が第1波以上に増加することはない（図26から図32参照）。このことは、パンデミックの安定的収束には、システム外からの感染者の混入を防止することが極めて重要であることを示している。もし、第2波の感染者数や死者数が第1波以上に増加することがあるとすれば、その原因は、多量のウイルスを保有する感染者がシステム外から新たに加わることにあるといえる。この観点から空港などにおける海外からの渡航者に対する感染者識別は特に重要である。

また、図5に示す傾向が起こるのは、抗体を含む免疫効果によるウイルス排除率が一定であれば、ウイルス数が少ないほどより短期間にウイルス数がゼロに近くなるためである。このことは、感染するか否かよりも感染時のウイルス数の多寡が問題であり、感染時に混入するウイルス数が少なければ早期に治癒するため感染の実害は小さいこと、一方多量のウイルスを保有している感染者ほど他人を感染させる悪影響が大きいことを示している。またこのことは、感染しているか否かのオンオフ判定になっているPCR検査に対して、感染によるウイルス多寡の尺度判定にもなりうる検温が実用的に有効であることを示唆している。

これまでの医学的知見から、感染による体温上昇（発熱）は免疫がウイルスと戦っていることの証とみなせること、即ち、免疫力は体温が高いほど大となり、感染による発熱は人体に

おける免疫力発揮のための自動調整作用の結果といえることが知られている[19]。このことから、遭遇した相手が感染者の場合、体温が高い人ほど多量のウイルスを保持していると考えてよいと思われる。このことから、検温による体温判定は、感染者の保有するウイルス数の多寡を識別する手段として有効と考えられる。

この観点から、検温は感染者識別の有効な手段といえる。またマスク着用などによるウイルス吸収率低下の対策は感染時のウイルス個数を低下させるため感染拡大抑制に有効である。

5.3 感染拡大の抑制と防止策

感染拡大を抑制する方策の一つとして、人々の行動を制限することは有効である。しかし、行動制限は経済活動の停滞をもたらし、経済を悪化させる。

経済の悪化を最小限に抑えつつ感染拡大を抑制するためには、健常者が感染者と遭遇する確率を限りなく小さくするという観点が必要である。感染者数は一般に健常者数に比べて少ないので、両者を区別せずに全人口に対して行動を制限することは極めて非合理的である。

このことから経済悪化防止と感染拡大抑制を両立させるためには次の方策が有効と考えられる。但しここではワクチン未開発の状態を想定している。

1) 感染者と健常者との識別の徹底

感染者の識別には PCR 検査が有効とされている。この観点から、望む人には何度でも PCR 検査を行える体制を確立することは有効な対策の一つといえる。一方、PCR 検査は感染しているか否かのオンオフ判定であり、感染者が保有するウイルス数に関する情報を与えるものとはなっていない。

考察の項で述べたように、感染者の識別において、感染者が保有するウイルス数が大きいほど感染伝播の悪影響が大きく、一方体内にウイルスを保有する感染者であっても保有するウイルス数が少なければ感染伝播の悪影響は小さい。免疫と体温の関係に関するこれまでの医学的知見[19]を踏まえれば、検温による体温判定は、感染者の保有するウイルス数の多寡を識別する手段として有効と考えられる。平熱の体温の個人差は大きい、一般に 36.5℃から 37.5℃は平熱の範囲内とみなせる[20]ことから、検温して 37.5℃以上を感染者とみなす方法は感染者を識別する簡便で有効な方法と考えられる。なお、平熱が低い人の場合には体温が 37.5℃以下であっても感染者である可能性は起こりうるが、上述の理由から感染に対する実害は小さいものと考えられる。一方体温が 37.5℃以上であっても発熱の原因がウイルスとは異なるケースもありうるが、37.5℃以上の感染者識別の閾値とすることは感染防止の観点から安全サイドの判定とみなせる。

2) 感染者の社会的隔離

- ・社会的に感染者を識別した上で、社会的隔離などによって感染者のみ行動を制限する。

隔離場所としては、病院内、ホテル内、自宅などが考えられる。

- ・個人的に自分が感染者か健常者認識し、感染者であれば行動を自粛する。この場合は各自が自分の平熱を把握しておき、体温が平熱より高ければ例えその値が 37.5℃以下であっても感染していると認識して、体温が平熱に戻るまで外出を控えることが有効といえる。

- ・海外からの感染者の識別と隔離は特に重要である。感染者識別手段として検温して 37.5℃以上の入国者は平熱に戻るまでの間社会的隔離を徹底することが感染拡大の観点から

極めて重要と考えられる。ウイルスを特に多量に保有する感染者のみを入国制限する観点からは、もし必要であれば感染者識別の閾値を 37.5°C より高くすることも考えられる。

3) 蜜な場所（夜の盛り場、イベント、会議室、職場等）では徹底した感染者隔離と感染予防策を講じる。

- ・入場者の検温、体温高めで感染者の可能性が高い場合（例えば体温が 37.5°C 以上）には入場を拒否する。
- ・場内では徹底的感染予防策を講じる（マスク着用推奨、場内消毒等）。
- ・これらの対策を講じない業者に対しては法的な罰則を設ける。

4) 感染者との接触に関わる情報をネットワーク内で共有することを可能とする技術の活用

（例えばスマホによる位置情報に基づく行政レベルでの行動管理とクラスター解析等）

ただし、個人レベルで検温による感染状態管理とそれによる行動管理が十分に行われて、いけば必要ない。検温管理を補完する技術と言える。

6. 結論

免疫と抗体およびウイルスの数を考慮した ABM 感染モデルを構築し、感染拡大と収束の挙動の計算結果を実現象データと比較するとともに、感染拡大と収束に及ぼす諸要因の影響を解析し、感染拡大収束のメカニズムおよび感染拡大防止策について検討した。その結果以下の事柄が判明した。

- 1) 新規感染者数、新規回復者数、および感染者数の推移の計算値は実現象の推移と定性的に一致した。また本モデルによって、行動制限後の制限解除によって生じる感染者の再増加（第2波の発生）も再現された。
- 2) 感染拡大の基本メカニズムは健常者が感染者と遭遇する確率が累進的に増加するためであり、感染拡大収束の基本メカニズムは回復者の増加に伴い上記確率が累進的に低下するためといえる。
- 3) この基本メカニズムにおいて抗体発生の有無は本質的に無関係である。ただし、抗体発生は早期に回復する者の割合を増加させるため、感染収束の安定化には有効と言える。
- 4) 感染によって体内に混入するウイルスの数が少ないほど回復に要する期間は短くなる。このため、感染するか否かよりも感染時のウイルス数の多寡が問題であり、多量のウイルスを保有している感染者ほど他人への感染力は大きいといえる。

これまでの医学的知見から、感染による体温上昇は免疫作用の結果であることから、検温による体温判定は、感染者の保有するウイルス数の多寡を識別する手段として有効と考えられる。

この観点から、検温は感染者識別の有効な手段といえる。またマスク着用などによるウイルス吸収率低下の対策は感染時のウイルス個数を低下させるため感染拡大抑制に有効である。

- 5) 同一構成員からなる閉じたシステム内では、感染伝播の進行とともに感染によって体内に混入するウイルス数は低下する。これは感染によって健常者に移転されるウイルスは感染者の保有するウイルスの一部であること、及び感染者保有のウイルス数が免疫効

果によって時間経過とともに低下するためである。この効果によって、感染伝播の影響は時間経過とともに低下し、パンデミックは自立的に収束する。またこの効果によって、行動制限後の制限解除などによって感染者の再増加（第2波）が起こったとしても、感染者が第1波以上に増加することはない。

第2波の感染者数が第1波以上に増加することがあるとすれば、その原因は、多量のウイルスを保有する感染者がシステム外から新たに加わることにありといえる。この観点から空港などにおける海外からの渡航者に対する感染者識別は特に重要である。

- 6) 感染拡大の抑制と経済活動を両立させるためには、感染者を識別し感染者のみに行動制限を課する方策が有効である。感染者識別にはPCR検査のほか、より簡便に実施できる検温が有効と考えられ、密な場所では検温により体温が予め定めた閾値(例えば37.5℃)より高い場合には入場を拒否または制限することが有効と考えられる。同様に海外からの入国者の検温と高体温者の隔離は必須要件と考えられる。

参考文献

1. Bailey, N.T. J. : The Mathematical Theory of Infectious Diseases(Mathematics in Medicine series) Graffin, London (1975).
2. Li, M.Y. : An Introduction to Mathematical Modeling of Infectious Diseases (Mathematics of Planet Earth), Springer (2019)
3. Britton, T. and Ball, F. : Stochastic Epidemic Models with Inference (Lecture Notes in Mathematics), Springer (2019)
4. Marchuk, G.I. : Mathematical Modeling of Immune Response in Infectious Diseases(Mathematics and Its Applications), Kluwer Academic Publishers (2019)
5. Anderson, R.M. and May, R.M. : Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control, Oxford University Press, New York (1991).
6. Vynnycky, E. and White, R. : An Introduction to Infectious Disease Modelling, Oxford University Press, New York (2010)
7. Wilensky, U. and Ran, W. : An Introduction to Agent-Based Modeling, The MIT Press, London (2015)
8. Epstein, J.M., Axtell, R. : Growing Artificial Societies,(Social Science from the Bottom Up), MIT Press, London (1996)
9. Ogibayashi, S and Takashima, K : Influence of Inefficiency in Government Expenditure on the Multiplier of Public Investment, Comput Econ (2017) 50:549–577, DOI 10.1007/210614-017-9671-y
10. Ogiayashi, S., Takashima, K. : System Structure of Agent-Based Model Responsible for Reproducing Business Cycles and the Effect of Tax Reduction on GDP,” Journal on Policy and Complex Systems, Vol.5, No2, Fall, pp. 37–59 (2019)
11. Ogibayashi, S. and Shinagawa, K. : Model Structure of Agent-Based Artificial System for Reproducing the Emergence of Bullying Phenomenon, Proceedings of the 2018 Conference of the Computational Social Science Society of the Americas, Springer, pp229-250 (2020)

12. Perez, L. and Dragicevic, S. : An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread, International Journal of Health Geographics,8,50,(2009) <https://doi.org/10.1186/1476-072X-8-50>
13. Li, Yan et al. Agent-Based Modeling of Chronic Diseases: A Narrative Reviews and _future Research Directions, PREVENTING CHRONIC DISEASE Public health research, practice, and policy, 13, E69, May (2016)
14. Tuomisto, J.T., et al. : An agent-based epidemic model REINA for COVID-19 to identify destructive policies, April (2020), <https://doi.org/10.1101/2020.04.09.20047498>
15. Rockett, R.J. et al. : REVEALING COVID-19 TRANSMISSION BY SARS-CoV-2 GENOME SEQUENCING AND AGENT BASED MODELING, APRIL (2020), <https://doi.org/10.1101/2020.04.19.048751>
16. David Eden,: Beyond the antibodies: How our immune system may protect us against COVID-19 infection, <https://abcnews.go.com/Health/antivodies-/story?id=71879020>
17. Worldmeter/coronavirus_updates
<https://www.worldometers.info/coronavirus/country/japan/>
18. <https://www.dailymail.co.uk/health/article-8363125/Not-recovered-coronavirus-patients-develops-neutralizing-antibodies.html>
19. We Shu Teng: "Body temperature and immunity" available at <https://orientalmedicalcare.com/2020/03/26/body-temperature-and-immunity/>
20. Ilchi Lee: "Raise your body temperature to boost your immunity" available at <https://www.changeyouenergy.com/blog/2582/20200311-ilchi-lee-authentic-living-raise-your-body-temperature-to-boost-your-immunity>