

令和2年度卒業研究論文

小規模「人工」社会における
感染症流行とエージェントの行動制限

法政大学 理工学部 経営システム工学科

経営数理工学研究室

17X4025 黒川 暁史

17X4037 反り目 智哉

指導教員 五島 洋行 教授

学科名	経営システム工	学籍番号	17X4025 17X4037
申請者氏名		黒川 暁史 反り目 智哉	
指導教員氏名		五島 洋行	

論文要旨

論文題目	小規模「人工」社会における 感染症流行とエージェントの行動制限
------	------------------------------------

本研究では、緊急事態宣言等の外出自粛要請、つまり感染症流行下における人々の行動制限が効果を発揮する適切なタイミング、及びその強度を検討する。マルチエージェント・シミュレーションを用いて形成した「人工社会」に感染症の罹患者を与え、エージェントの行動を制限することが感染症拡大にもたらす影響を実験・比較する。感染症拡大を3フェーズに分け、3,000人のエージェントを行動制限に従うグループと従わないグループに分類し、その割合を変えてシミュレートする。従来の感染症数理モデルでは、感染症流行下における人々の行動に関して前提をおいているが、マルチエージェント・シミュレーションを用いることで人々の行動に基づく感染症流行をシミュレートできる。

本研究の実験の結果、初期感染人口の割合によって必要な行動制限の強度は大きく異なることがわかった。

目次

第1章	序論.....	1
1.1.	研究背景.....	1
1.2.	研究の目的.....	3
1.3.	論文構成.....	3
第2章	関連知識.....	5
2.1.	感染症数理モデル.....	5
2.1.1.	基本再生産数.....	5
2.1.2.	SIR モデル.....	5
2.1.3.	SEIR モデル.....	7
2.2.	マルチエージェント・シミュレーション.....	7
2.3.	関連研究.....	8
2.3.1.	SEIAR モデル.....	8
2.3.2.	SIS モデル.....	9
第3章	シミュレーションの前提と使用環境.....	10
3.1.	感染確率.....	10
3.2.	潜伏期間と発症期間.....	10
3.3.	感染症拡大のフェーズ.....	10
3.4.	エージェントの行動範囲.....	10
3.5.	行動制限の強度.....	11
3.6.	エージェントの状態.....	11
3.7.	パラメータ.....	12
3.8.	実行環境.....	12
第4章	数値実験.....	13
4.1.	SEIR モデルのグラフ化.....	13
4.2.	MAS におけるエージェントの状態.....	14
4.3.	両者の比較.....	15
第5章	シミュレーションの結果と考察.....	16
5.1.	フェーズ1 <初期感染人口 0.1%>.....	16

5.2.	フェーズ 2 <初期感染人口 0.5%>	16
5.3.	フェーズ 3 <初期感染人口 1%>	17
5.4.	考察.....	17
5.5.	まとめ	18
第 6 章	結論.....	20
6.1.	総括.....	20
6.2.	COVID-19 の拡大.....	21
謝辞	23
参考文献	24

第1章 序論

1.1. 研究背景

2019年11月に中華人民共和国湖北省武漢市において「原因不明のウイルス性肺炎」が確認された。新型コロナウイルス感染症（COVID-19：coronavirus disease2019）と称されたこのウイルス性肺炎は世界各地に拡がりを見せ、翌年の1月には日本でも感染者が確認された。世界保健機関（WHO）によると、2020年11月上旬に累計感染者数5000万人を上回った。そのうち死亡者は125万人超となり、世界各地で未だ深刻な事態となっている[1]。我が国においても2020年10月末に累計感染者数10万人を超え、深刻な事態となっている。

この未知なる感染症を終息させるために、日本政府ではこれまでも様々な策が講じられ、実際にそれらが打たれてきた。厚生労働省によると、2020年1月28日に新型コロナウイルス感染症に関して、感染症法に基づく「指定感染症」と検疫法の「検疫感染症」に指定する政令を閣議決定し、公布したとされている[2]。その後「新型コロナウイルス感染症対策本部」（政府対策本部）が設置され、以後、これが政府の対応の中心となった。この新型コロナウイルス感染症は、未知な部分が多く、全ての罹患者が一定の症状を示すわけではない。国や地域によって致死率が異なり、特に日本では感染した人のほとんどが無症状または軽症であることが多い。このような特徴から、感染は止まることなく拡がり、現在も世界中で感染者が増え続けている。

拡大の一途となる感染症に対して、世界保健機関は2020年1月30日に緊急事態（PHEIC：Public Health Emergency of International Concern）を宣言した。ここで「社会的距離の確保（social distancing）」の推奨など、早期の解決方法を提供した。また、日本においても様々な政策とともに同様の緊急事態宣言が同年4月に発令され、密閉・密集・密接の3つの密を防ぎ、外出を自粛することを国民に呼びかけた。国内における1日あたりの核酸増幅法（PCR：polymerase chain reaction）検査陽性者数の推移を図1に示す。緊急事態宣言等による国民の外出自粛によって一度は収束したかのように思えた新型コロナウイルス感染症であったが、同年7月頃から再び陽生者数が増加する事態となった。

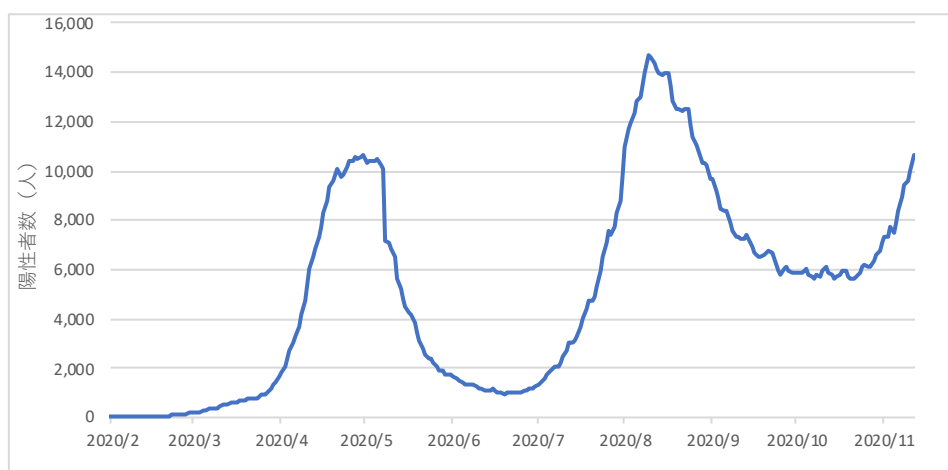


図1 国内における1日あたりの陽性者数の推移[3]

我が国の緊急事態宣言に関して、読売新聞社が行った世論調査[4]では、発令したタイミングが「遅すぎた」という意見が81%を占めた。国民が感じていた発令の遅さが正しかったのか、2020年12月現在も感染者が増加している。

現在、同年8月に起きた感染における「第二波」を上回る勢いで、感染拡大のペースが急速になり、「第三波」と言われる新たな感染拡大期を迎えようとしている。緊急事態宣言を発令することで、人々の接触が大幅に削られるため、新規感染者は減少する。しかし、外出自粛や休業要請等、人々の行動を過度に規制することは、経済に大きな打撃を与えるため、両機関の継続は困難であり、感染症の封じ込めと経済の両立が問題として浮き彫りになっている。日本における実質国内総生産（GDP：gross domestic product）成長率を図2に示す。経済成長の指標として挙げられるGDPは、2020年4月7日に発令された緊急事態宣言の発令期間で29.2%の落ち込みを記録した。

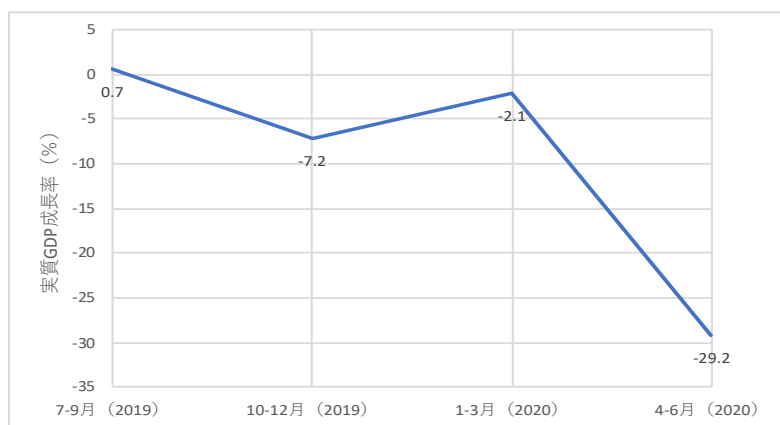


図2 日本における実質GDP成長率（年率換算）[5]

緊急事態宣言を発令することによって得られる効果の裏側には、経済の落ち込みという面で生活を苦しめる危機が存在することを留意する必要がある。また、経済の面に加えて、医療機関の病床逼迫も問題である。多くの地域で病床の使用率が高くなり、現時点での感染状況を踏まえると、問題の深刻化は進む一方である。

様々な側面と隣り合わせの状況で、再度緊急事態宣言を発令する必要性の有無、また、最大限効果を発揮する適切なタイミングや条件を検証することが重要である。では、適切なタイミングとは如何なる時であるのだろうか。4月の同宣言では、通勤等で止むを得ず外出をした人々もいる。どの程度の人々が外出自粛に従うことで効果が現れるのだろうか。

1.2. 研究の目的

本研究の目的は、「遅すぎた」と言われた緊急事態宣言等の外出自粛要請、つまり感染症流行下における人々の行動制限が効果を発揮する適切なタイミング、及びその強度を検討することである。社会を模した仮想環境を作り、そこで多数の主体であるエージェントを各自のルールのもと動作させるシミュレーションを用いた研究は、人工社会研究と呼ばれている。そのようなエージェントベースのシミュレーションの一つである、マルチエージェント・シミュレーションを用いて小規模の人工社会を形成し、感染症を流行させるとともにエージェントの行動を制限することで、その効果を検証する。また、その過程において、従来の感染症数理モデルとマルチエージェント・シミュレーションの関係について実験、比較する。

1.3. 論文構成

本論文は全6章で構成される。

2章では、本研究を説明していく上で必要な数理モデルや用語などの関連知識について説明する。

3章では、本研究で行うシミュレーションの前提条件について詳しく述べ、シミュレーションの実行環境について説明する。

4 章では,感染症数理モデルとマルチエージェント・シミュレーションのそれぞれにおいての感染症流行をグラフ化し, 比較する.

5 章では, マルチエージェント・シミュレーションにおける初期感染人口の割合ごとに分けられた各フェーズの結果とともに, それらを比較し, 考察する.

6 章では, 本論文の結論を述べ, 今後の課題についても述べる.

第2章 関連知識

本章では、本論文で用いる手法やモデルに関する知識について記述する。

2.1. 感染症数理モデル

我々にとって身近なインフルエンザ急性感染症が毎年同様の時期に拡大し、収束していくように、感染症は定期的に繰り返されている。この事実は、数理的思考をする人々に、数理モデルの構築が可能ではないかと思わせてきた。

本節では、感染症における基本再生産数と、単純な感染症数理モデルについて記述する。

2.1.1. 基本再生産数

基本再生産数は、以下のように定義されている[6].

基本再生産数 R_0 は、全員が感受性である人口集団に一人の感染者が持ち込まれた場合に、その感染者の感染性が持続する期間内に直接感染を受ける人数の平均値である。

2.1.2. SIR モデル

単純な感染症数理モデルとして、ケルマックとマッケンドリックの第一論文において提起された SIR モデルがある[7]。これは幼児期の感染症を扱ったモデルであり、以下のような前提が置かれていることが多い[8].

- 出生数と死亡数が等しく、人口は一定である。
- 感染したと同時に他の人に感染させる能力をもつため、潜伏期間は0である。
- 感染性を有する期間は、症状を有する期間と等しい。

感染症は集団の外部で感染した一人から持ち込まれ、常に以下の三つの集団に分けられる。

- S : 感受性のある人の集団 (Susceptible)
- I : 現在感染しており、感染性を有している集団 (Infected)
- R : 免疫を持っており、以降は感染しない集団 (Recovered)

この三つのパラメータが流行の進行（時刻 t ）に伴いどのような変化をするかは、以下の微分方程式に従う。ここで、 $\beta > 0$ は単位時間あたりの感染確率、 $\gamma > 0$ は単位時間あたりの回復確率を示し、 $\beta I(t)$ は時間 t における感染力と定義される。また γ^{-1} は感染期間が指数分布に従うと仮定した場合の平均値を示す。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt}(t) = -\beta S(t)I(t) \\ \frac{dI}{dt}(t) = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR}{dt}(t) = \gamma I(t) \end{array} \right. \quad (2.1)$$

このとき、(2.1)において全人口 $N(t) = S(t) + I(t) + R(t)$ と置くと、 $dN(t)/dt = 0$ より全人口サイズは保存されている。感受性がある全人口を N とする。時刻 $t = 0$ で少数の感染者が発生した場合、初期段階では感受性人口の減少効果は小さいので、 $S(t) \approx N$ とおける。よって感染人口の動態は、以下のような線形化方程式で記述できる。

$$dI(t)/dt = (\beta S_0 - \gamma)I(t)$$

したがって初期の感染人口は指数関数的成長法則で増加すると考えられる。

$$I(t) = e^{(\beta S_0 - \gamma)t} I(0)$$

流行が起きる条件は、初期成長率が正であること、すなわち $\beta S_0 - \gamma > 0$ である。これは、

$$\frac{\beta S_0}{\gamma} > 1 \quad (2.1.1)$$

と書き直せる。この左辺は(2.1)の基本再生産数 R_0 を与えている。感受性集団のサイズを S_0 とすると、侵入した感染者 X は単位人口あたり単位時間あたり βS_0 という二次感染者を発生させるが、感染性を保有する期間 $T := 1/\gamma$ を用いると感染者一人あたりが感染性を保有している期間に生産する二次感染者総数が得られる。また感染性を保有する期間が $1/\gamma$ であることは、感染者にとって感染からの経過時間 t において回復や隔離される確率密度が $\gamma e^{-\gamma t}$ であることによる。よって、 $1/\gamma = \int_0^{\infty} t \gamma e^{-\gamma t} dt$ である。以上のことから基本再生産数は、 $R_0 = \beta S_0 / \gamma$ で示される[9]。

2.1.3. SEIR モデル

前節の SIR モデルでは人口を三つの集団に分類したが, Susceptible, Infected, Recovered に加えて,

- E : 現在感染しているが, 感染性を有する前の集団 (Exposed)
- も考慮して, 四つの集団でモデルを構成することができる (SEIR モデル) [10].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt}(t) = -\beta S(t)I(t) \\ \frac{dE}{dt}(t) = \beta S(t)I(t) - \varepsilon E(t) \\ \frac{dI}{dt}(t) = \varepsilon E(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR}{dt}(t) = \gamma I(t) \end{array} \right. \quad (2.2)$$

ここで ε は暴露後に感染性を得る率であり, ε^{-1} は感染待ち時間が指数分布に従うと仮定した場合の平均値である.

2.2. マルチエージェント・シミュレーション

マルチエージェント・シミュレーション (以下 MAS) とは, 複数のエージェントを用いて, 社会現象など人間の意思決定に基づいた複雑な現象の仕組みを分析するシミュレーションである. 複数の人や生物を異質に扱い, 細かな条件を設定することで複雑な現象を表すネットワークモデルを作成することが可能である. 様々な特徴をもつ人々が生活する人間社会において, それらの相互作用をシミュレーションすることで, 実際に起こりうる状況を再現し, 予測する.

2.3. 関連研究

2.3.1. SEIAR モデル

感染症数理モデルは SIR モデルを基礎として、修正や拡張を繰り返しながら様々な発展を遂げてきた。ここでは類似研究として、症状の有無で集団を分類する、拡張された感染症数理モデルについて述べる [11]。新型コロナウイルス感染症は、潜伏期間であるため未発症の感染者とは異なり、発症者であるにもかかわらず特別な症状がない無症状感染者が多数存在する。そのような感染症の特性に則したモデルを提案している。2.1.3.の SEIR モデルでは人口を4つの集団に分類を行なったが、SEIR モデルをもとに、以下のように感染症の発症者の区画に無症状感染者の区画を与えることで、5つの集団でモデルを構成している。

- I : 現在感染しており、感染性を有している集団 (Infected)
において無症状感染者の区画を与えた
- A : 現在感染しているが無症状で、弱い感染性を有している集団
(Asymptomatic)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)(I(t) + \alpha A(t)) \\ \frac{dE(t)}{dt} = \beta S(t)(I(t) + \alpha A(t)) - \varepsilon E(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \varepsilon \zeta E(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dA(t)}{dt} = \varepsilon(1 - \zeta)E(t) - \delta A(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) + \delta A(t) \end{array} \right. \quad (2.3)$$

ここで α は症状がある感染者と症状がない感染者の感染力の比、 ζ は発症率、 δ は症状がない感染者が陰性になる確率で、 δ^{-1} は陰性になるまでの日数の平均値である。SEIAR モデルで $\alpha=0$, $\delta=1$, $A(0)=0$ のとき、SEIR モデルに一致する。以下、SEIAR モデルにおけるエージェントの状態遷移を図3に示す。

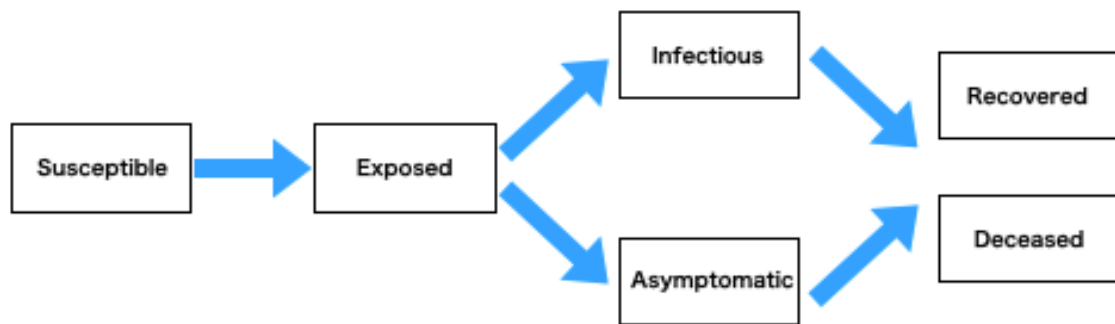


図3 SEIARモデルにおけるエージェントの状態遷移

2.3.2. SISモデル

これまでの感染症数理モデルは、一度感染症を発症し回復した場合に免疫を獲得する前提であったが、必ずしも全ての感染症がそれにあてはまるわけではない。SISモデルは、このように免疫を獲得できず、感染者は回復と同時に感受性者に戻る感染症に対する感染症数理モデルである[12]。新型コロナウイルス感染症は、現時点において一時的な免疫の確認はされているが、一定期間経つと再度感染する可能性も言及されており、この感染症の解明が進めば、広く用いられる感染症モデルであると予想される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t) + \gamma I(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t) \end{array} \right. \quad (2.4)$$

第3章 シミュレーションの前提と使用環境

3.1. 感染確率

Klompas ら[13]によると, SARS-CoV-2 に関して, 感受性を有する者が罹患者と濃厚接触した場合に感染する確率は 0.05 と報告されている. これは食事の際や同世帯内での接触を除く値であり, 均等に拡がることはなく, 接触時間とその強度に基づいている.

これをもとに本研究では, 「感染性を有するエージェントが感受性のあるエージェントと接触した場合, 前者が感染性を有する確率」を感染確率とし, これを $\beta = 0.05$ とする.

3.2. 潜伏期間と発症期間

Lauer ら[14]によると, COVID-19 に関して, 潜伏期間の中央値は 5.1 日 (95%信頼区間, 4.5~5.8 日) と推定され, 発症期間は 11.5 日 (97.5%信頼区間, 8.2~15.6 日) とされている.

これをもとに感染症の潜伏期間を 5 日, 平均感染期間を 12 日としてシミュレーションを実行する.

3.3. 感染症拡大のフェーズ

シミュレーション実行にあたり, 感染症拡大の様相をいくつかのフェーズに分解する. 本研究では, 初期感染人口を変動させることでフェーズの転換期を再現し, それぞれ全人口の 0.1%, 0.5%, 1% と設定した場合をフェーズ 1 (流入期), 2 (拡大期), 3 (蔓延期) とする.

各フェーズにおいてエージェントの行動制限を行い, 累計感染者数, 死亡者数がより少ない場合を制限の効果があると判断する.

3.4. エージェントの行動範囲

エージェントの行動を制限するにあたり, 全エージェントを二つのグループに分類する. 一方を行動制限に従うエージェントのグループ, 他方を従わないエージェントのグ

ループとする。前者の行動範囲を半径 1，後者の行動範囲を 2 とする。ただし，ワールドの大きさは 50 四方であり，発症状態のエージェントの行動範囲は 0 とする。

3.5. 行動制限の強度

緊急事態宣言下では，東京都，神奈川県，千葉県，埼玉県，大阪府，兵庫県，福岡県の 7 都府県におけるある平日の外出率は，表 1 のようにおおよそ 50%まで低下した [15]。これに基づき，本シミュレーションでは，前項で述べた行動制限に従うエージェントの割合を 30%，50%，70%と変動させ，それぞれ自主的な外出自粛，緊急事態宣言と同様の行動制限，それ以上の強制力のある行動制限を再現する。

表 1 「緊急事態宣言」後の外出率 2020 年 4 月 13 日（月曜日）

	東京都	神奈川県	千葉県	埼玉県	大阪府	兵庫県	福岡県
外出率 (%)	48.1	45.8	52.3	48.8	48.3	50.5	53.3

3.6. エージェントの状態

エージェントの状態は SEIR モデルで用いる Susceptible, Exposed, Infected, Recovered に Deceased (死亡者) を加えた五つの状態に分類する。五つの状態の遷移は図 4 のとおりである。

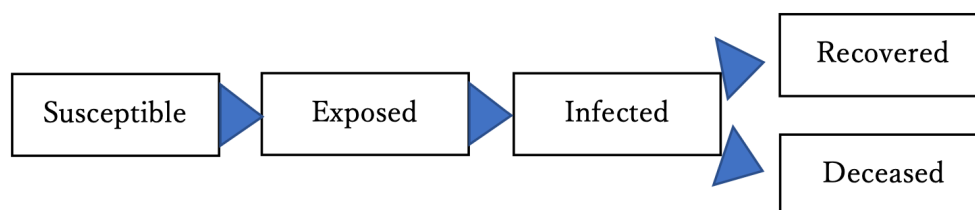


図 4 エージェントの状態遷移

また，シミュレーションの終了条件は全てのエージェントが Susceptible, Recovered, Deceased のいずれかの状態になることである。

3.7. パラメータ

本シミュレーションにおいて設定するパラメータは以下である。ただし、シミュレーションにおける1ステップを1日とする。

表2 シミュレーションにおけるパラメータ

人口	3,000 人
感染確率	0.05/日
平均感染期間	12 日
潜伏期間	5 日
重症化の確率	0.2/日
重症時の死亡率	0.2/日
初期感染人口	3, 15, 30 人
行動制限に従うエージェントの割合	0, 30, 50, 70%

重症化の確率及び重症時の死亡率は、厚生労働省オープンデータ[3]をもとに計算したおおよその値を参考としている。また、初期感染人口、行動制限に従うエージェントの割合を変動させることで感染症拡大の様相を比較する。これらの変動については、それぞれ3.3, 3.4, 3.5で述べた前提に従うものとする。

3.8. 実行環境

プログラムの言語は Python 3.8.1 を用いる。シミュレーションの実行環境として、構造計画研究所の「artisoc マルチエージェント・シミュレーションプラットフォーム」[16]を用いる。バージョンは以下のとおりである。

- artisoc Version 4.2

第4章 数値実験

SIRモデルを代表とする感染症数理モデルは、ミクロな感染過程について仮定をおき、マクロな感染過程における常微分方程式を構築して表される。対してMASは、エージェント間の感染過程をシミュレートするシミュレーションである。前者は全ての人を同質に扱うが、後者は異質に扱う。そのような点において、両者は対極の位置にあると言える。

本章では、両者の感染症流行をグラフ化し、関係を考察して記述する。

4.1. SEIRモデルのグラフ化

感染症数理モデルの一例として、2.1.3.において記述したSEIRモデルをグラフ化したものが図5である。縦軸はエージェントの状態の割合、横軸は期間を示す。ここでは、初期値として表3の示す値を与えた。

表3 SEIRモデルに与えた初期値

Susceptible の割合	$S_1 = 0.999$
Exposed の割合	$E_1 = 0$
Infected 割合	$I_1 = 0.001$
Recovered の割合	$R_1 = 0$
感染確率	$\beta = 1$
平均感染期間	$\gamma^{-1} = 12$
潜伏期間	$\varepsilon^{-1} = 5$

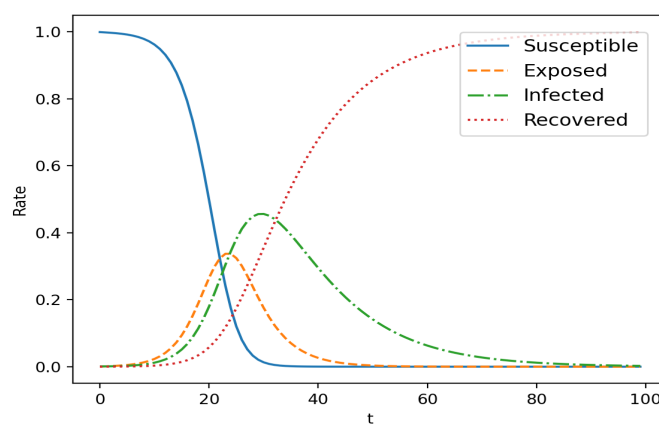


図5 SEIRモデルにおける各状態の推移

4.2. MAS におけるエージェントの状態

MAS において前節と同様の初期値を与えてシミュレーションを行い、エージェントの状態の推移をグラフ化する。エージェントの行動範囲を 1, 1.5, 2.0 としたものをそれぞれ図 6-1, 6-2, 6-3 として示す。ただし、ここでは 4.1.と同様の条件とするため、感染確率を 1 とする。

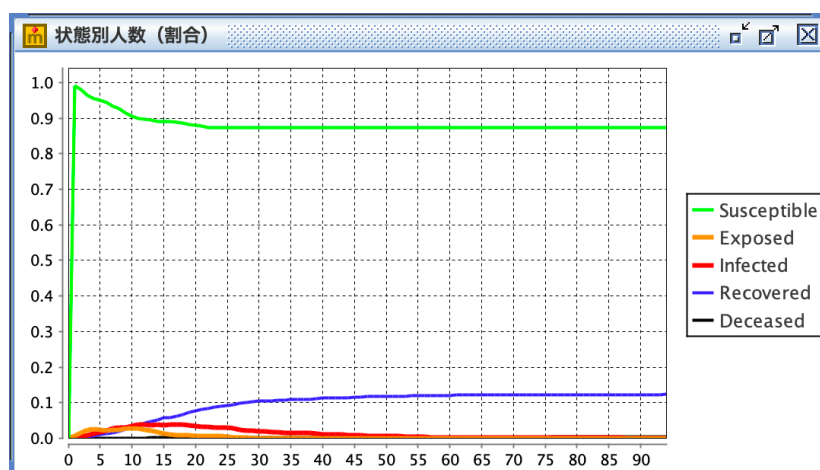


図 6-1 エージェントの状態 (行動範囲 1.0)

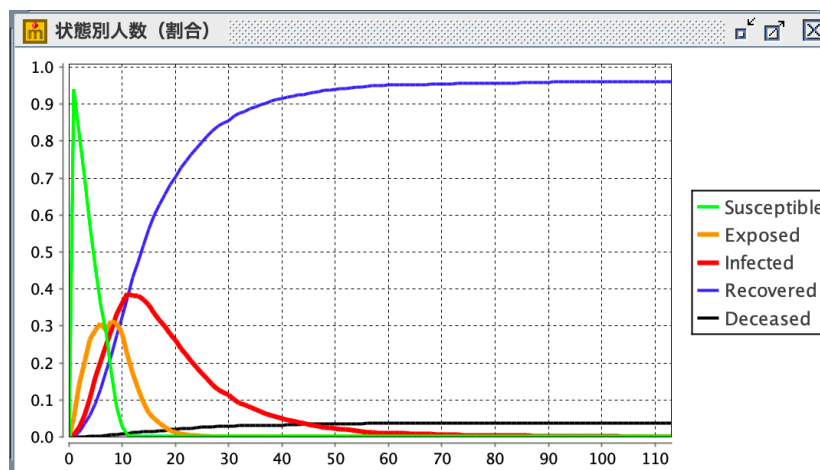


図 6-2 エージェントの状態 (行動範囲 1.5)

エージェントの行動範囲が 1.0 の場合、感染症が全人口に拡大することなく収束していることがわかる。対して 1.5, 2.0 の場合は、感染症がほぼ全人口に拡大し、その後緩やかに収束している。また、いずれの場合も初めに Exposed が増加し、その後 Infected が増加する結果となった。

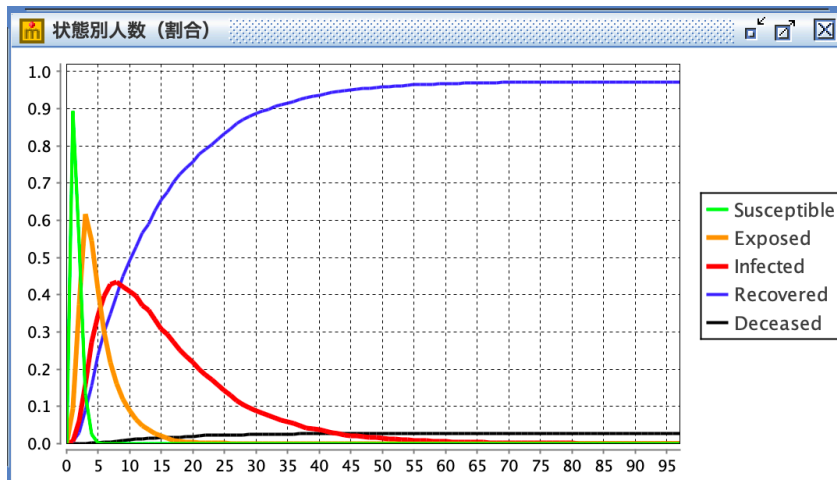


図 6-3 エージェントの状態 (行動範囲 2.0)

4.3. 両者の比較

グラフを比較すると、MAS においてエージェントの行動範囲を 1.5 とした場合の図 6-2 は、図 5 の SEIR モデルのグラフと類似した形状となった。また行動範囲を 2.0 とした図 6-3 は、爆発的に Exposed が増加し、その後 Infected が増え、緩やかと Recovered が増えていくという結果となった。

対して図 6-1 では全てのエージェントの行動範囲を 1.0 としたことで感染症が比較的流行することなく、異なるグラフの形状を示した。感染症数理モデルでは、全ての人が均等に接触することを前提としているため、MAS におけるエージェントの行動範囲を広くすることで SEIR モデルのグラフに近づいた。エージェントの行動範囲を狭くすると、他のエージェントと接触する回数が減り、感染症は広まることなく収束していく。

次章では、この MAS において行動範囲の異なるエージェントを共存させることで行動制限を再現し、感染症流行にどのような影響を及ぼすのかを記述する。

第5章 シミュレーションの結果と考察

本章で結果として記述する数値は、各状況 10 回ずつシミュレーションを行い、得られた値の平均をとったものである。人口を 3,000 人とし、初期感染人口を 3, 15, 30 人としたものをそれぞれフェーズ 1, 2, 3 とする。各フェーズにおいて、行動を制限しない場合、自主的な外出自粛等の軽微な外出自粛を想定した行動制限 30% の場合、緊急事態宣言と同等の行動制限 50% の場合、それ以上の強制力のある行動制限 70% の場合をシミュレートする。

5.1. フェーズ 1 <初期感染人口 0.1%>

本節では、初期感染人口を 0.1% としたフェーズ 1 の感染症拡大の様相について記述する。表 3-1 のように、行動を制限するエージェントを 30% とした段階で、累計感染者数と死亡者数に大きな変化が見られる。制限をしない場合との比は累計感染者数がおおよそ 0.12, 死亡者数が 0.10 である。その後、50%, 70% となるにつれて比較的小さな変化ではあるが、制限の割合が大きいほど感染症の流行を抑制できることがわかる。

表 4-1 フェーズ 1 における感染症流行と行動制限

制限割合 (%)	0	30	50	70
累計感染者数 (人)	1579.1 (52.6%)	191.8 (6.3%)	60.2 (2.0%)	26.4 (0.9%)
死亡者数 (人)	50.6	5.1	1.2	0.6

5.2. フェーズ 2 <初期感染人口 0.5%>

本節では、初期感染人口を 0.5% としたフェーズ 2 の感染症拡大の様相について記述する。表 3-2 のように、エージェントの行動を制限しない場合、全体の 4 分の 3 以上が感染者となることがわかる。フェーズ 1 における制限割合 30% 相当の変化が見られるのは全体の 5 割の行動を制限した場合であり、フェーズ 2 においてはより強度の強い行動制限が必要であると言える。

表 4-2 フェーズ 2 における感染症流行と行動制限

制限割合 (%)	0	30	50	70
累計感染者数 (人)	2301.9 (76.6%)	649 (21.6%)	163 (5.4%)	112.9 (3.8%)
死亡者数 (人)	68.2	18.1	5.6	3

5.3. フェーズ 3 <初期感染人口 1%>

本節では、初期感染人口を 1%としたフェーズ 3 の感染症拡大の様相について記述する。表 3-3 のように、エージェントの行動を制限しない場合、フェーズ 2 と同等の感染症拡大が見られた。だが、エージェントの行動制限による感染症流行の変化は比較的小さく、7 割のエージェントの行動を制限した場合においても、フェーズ 1 における制限割合 30%相当の変化は得られなかった。

表 4-3 フェーズ 3 における感染症流行と行動制限

制限割合 (%)	0	30	50	70
累計感染者数 (人)	2292.9 (76.4%)	862.8 (28.7%)	351.4 (11.7%)	189.5 (6.3%)
死亡者数 (人)	67.0	25.5	9.3	5.7

5.4. 考察

3 フェーズにおける累計感染者数をまとめたグラフを図 7 に示す。初期感染人口を 0.1%としたフェーズ 1 では自主的な外出自粛等の軽微な行動制限によっても、感染症拡大に対して比較的大きな効果をもたらすことがわかる。これと同等の効果を得るためには、フェーズ 2 においては緊急事態宣言と同等の行動制限、フェーズ 3 においてはそれ以上の行動制限を強いることが必要であると言える。

また、エージェントの行動を制限しない場合に、フェーズ 2 とフェーズ 3 の累計感染者数、死亡者数が類似していたのは、全人口 3000 人において感染しうる最大の人数となっていたためであると考えられる。初期感染人口を徐々に増加させた場合においても

同様の累計感染者数、死亡者数となった。しかし、グラフを見てもわかるように、行動制限の効果に関しては初期感染人口の割合が大きく影響する。累計感染者数には影響が小さいが、本研究において初期感染人口が多いほど、つまり、より日々の感染者数が多い場合ほど、強力な行動制限が必要であると言える。

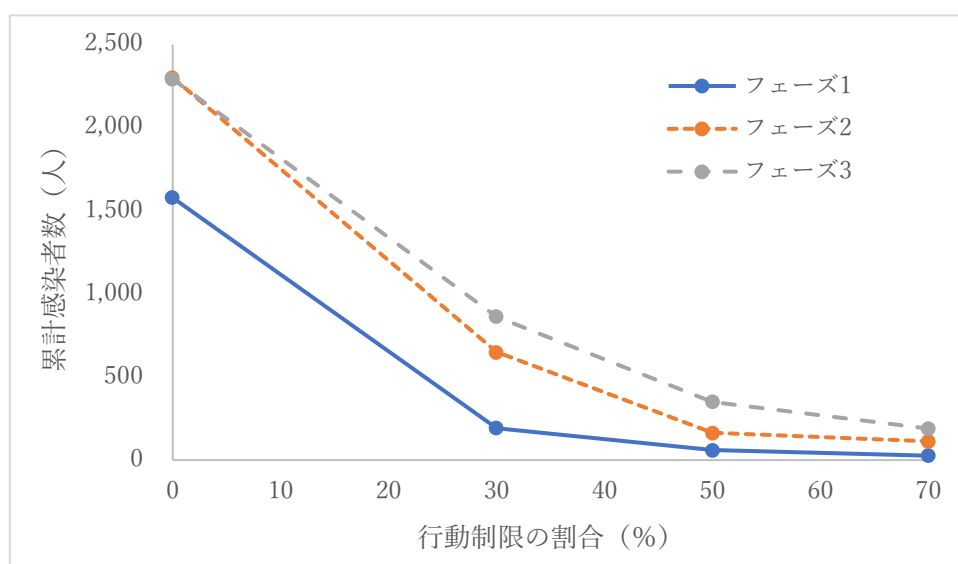


図7 累計感染者数とエージェントの行動制限（フェーズ別）

また、シミュレーションの終了条件は全てのエージェントが Susceptible, Recovered, Deceased のいずれかの状態となることとしたが、この終了条件を待たずして行動制限を解除すると、再び各フェーズと同様の状況となることが考えられる。感染症を終息させるためには、全ての Exposed, Infected がいない状態となってから行動制限を解除することが理想と言えよう。

5.5. まとめ

2020年4月に発令された緊急事態宣言では、外出率がおおよそ50%まで低下したが、これと同程度の行動制限は、初期感染人口を0.5%としたフェーズ2より前の段階でしか大きな効果を発揮しないことがわかった。また、行動制限をするエージェントが30%の場合、つまり外出率が70%程度の場合には、初期感染人口を0.1%としたフェーズ1でしか大きな効果を発揮しなかった。フェーズ3以降になると、全人口の70%以上を制限する強度の行動制限が必要である。

また、感染症を終息させるためには、これらの行動制限を発症者や潜伏感染者が0となるまで続ける必要がある。シミュレーションにおいては全人口を3000人としたため、この全てが Infected となったのち Recovered または Deceased となれば感染症は終息することとなるが、これは現実的に「終息した」とは言い難い。

第6章 結論

6.1. 総括

本研究では、緊急事態宣言等の外出自粛要請、つまり感染症流行下における人々の行動制限が効果を発揮する適切なタイミング、及びその強度を検討した。MASを用いることで、行動制限に従うエージェントと従わないエージェントを再現し、より現実に近いシミュレーションを行った。従来の感染症数理モデルによる感染症流行の前提を見直し、人々の行動に近いシミュレーションを行うことができた。

このシミュレーションの結果から、初期感染人口の割合に従って、行動制限の強度に大きく差が生まれる効果が得られた。このことから現実として行動制限の強度を下げる段階、パンデミック以前の生活に戻るためには、感染症流行の初期段階または感染者が人口に対して極めて低い割合の際に、エージェントの行動制限をしない選択ではなく、ある程度強度のある行動制限を強いることが感染拡大防止に繋がると言える。ゆえに、感染性を有しているエージェントを隔離せず、行動を制限しない場合は感染が終息することは非常に難しい。新規感染者数が多ければ多いほど、より強力な行動制限が必要であるため、早急に行動制限を施行することが重要である。

さらに、感染症が完全に終息するには、感染症の発症者または潜伏感染者の数を0にするまで行動制限を実施し続けることが必要である。全てのエージェントがSusceptible, Recovered, Deceasedのいずれかの状態になる前に行動制限を解除すると、減少している感染者数が増加し、感染拡大時期と同様の感染状況に再び戻る可能性が大いにあり得る。そのような事態に陥らぬよう終息に向けて徹底した対策が講じられることを願う。

また、本論文では感染者の発症者の症状の有無は考慮に入れていないが、この新型コロナウイルス感染症は罹患者の多くは無症状であるため、感染症を発症しているエージェントが多数存在している状態であり、現実では感染を拡大する大きな要因となっていることが考えられる。加えて一度感染した場合においても、免疫が長期に渡り残ることは明らかになっておらず、再度感染した例も報告されている。これらの事実を踏まえ、複雑ではあるがより現実的な条件を取り入れたシミュレーションを行うことが今後の課題である。

6.2. COVID-19 の拡大

現在も新型コロナウイルス感染症は世界中で拡大している。東京都では、2020年12月に1日あたり1000人近くのPCR検査陽性者が確認されている。東京都の人口は900万人超であり、陽性者の割合は0.01%程度であるため、フェーズ1における初期感染人口の割合より小さいが、この他に多くの潜伏感染者がいると推測できる。このため、全人口においてより大きな割合が行動制限、つまり外出自粛をすることが感染症を収束させるために必要であると言える。行動制限が如何に感染症流行に影響を及ぼすかをシミュレートしたが、本研究では、冒頭に述べた経済への影響を考慮していない。長期間にわたって人々の行動を制限することが経済に大きな打撃を与えることは明らかであり、これを実行することは難しい。しかし、人々の行動を制限することは感染症拡大に大きな抑制をかける、適切なタイミングに適切な強度で行動制限を行うことで、感染症が終息したのちに経済を回復させていくことがより良い手であると言えるのではないだろうか。本研究は経済への影響を考慮していないが、一度感染症流行を抑えとどめることに注力し、終息させるために活用できると言える。

様々な側面において考慮する必要のある新型コロナウイルス感染症であるが、2020年4月の同宣言よりも強制力のある体制を一時的に敷くことは、感染症終息への一歩となるであろう。

ミクロな視点で見れば、強制力のある行動制限を行うことは、経済に大きな打撃を与え、私たちの生活にも大きな影響が発生し、出口戦略として有効でないとと言えるかもしれない。しかし、現実として強制力の小さい行動制限を課してきた日本政府の政策では、終息の目処が立っていない上、経済の停滞に歯止めが効かない状態である。まさに感染者減少と経済が共倒れという状態になりつつある。それに対し、中国や台湾等の強制力のある行動制限を施行してきた国では、罹患者減少と経済の復興を実現している[17]。これらは、強制力のある行動制限や検査体制の強化を行ったことで、一時的な経済の落ち込みはあったものの、感染者の大幅な減少を実現した。また、感染者が増加した際の厳格な検査隔離により、結果としてパンデミック以前の生活や経済状態に戻すことに成功している。

両立することは並行することではない。優先順位を明確にし、フェーズごとに徹底的に実行することが重要である。前例のない問題を解決することは非常に困難だが、感染拡大からまもなく1年を迎えようとしている。パンデミック以前の生活や経済状態に戻

すことを目的に、合理的な判断をしていくことが必要である。現在、ワクチンの実用化が進んでいるが、終息を迎えたわけではない。一刻も早い事態の収束を切に願う。

参考文献

- [1] 世界保健機関：新型コロナウイルス感染症（COVID-19） WHO 公式情報特設ページ
https://extranet.who.int/kobe_centre/ja/covid（参照：2020年11月10日）
- [2] 厚生労働省：中華人民共和国湖北省武官市における新型コロナウイルス関連肺炎について（令和2年1月28日版）
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_08767.html
（参照：2020年11月13日）
- [3] 厚生労働省：オープンデータ <https://www.mhlw.go.jp/stf/covid-19/open-data.html>
（参照：2020年11月13日）
- [4] 読売新聞：世論調査 <https://www.yomiuri.co.jp/election/yoron-chosa/20200413-OYT1T50144/>（参照：2020年11月13日）
- [5] 内閣府：2020年7～9月期四半期別 GDP 速報（二次速報値）
https://www.esri.cao.go.jp/jp/sna/data/data_list/sokuhou/gaiyou/pdf/main_1.pdf
（参照：2020年12月22日）
- [6] 南就将, 水野洸太, 南隆二 (2013), 『異なる接触頻度を持つ個体からなる人口集団における感染症流行のモデル化について』, 慶應義塾大学, http://user.keio.ac.jp/~minami/notes_and_preprints/epidemic.pdf（参照：2021年1月10日）
- [7] W. O. Kermack and A. G. McKendrick (1927), “A contribution to the mathematical theory of epidemics”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*: pp.700–721.
- [8] ヨハン・ギセック (2020) 『感染症疫学－感染性の計測・数学モデル・流行の構造[新版]』 (山本太郎訳), 昭和堂
- [9] 稲葉寿 (2008), 『基本再生産数 R_0 と閾値原理』, 感染症の数理モデル, 培風館
- [10] 西浦博, 稲葉寿 (2006), 『感染症流行の予測：感染症数理モデルにおける定量的課題』 統計数理研究所, <https://www.ism.ac.jp/editsec/toukei/pdf/54-2-461.pdf>
（参照：2020年11月16日）
- [11] 長田直樹 (2020), 『区画に無症状感染者を持つ感染症の数理モデル』, 東京女子大学, https://www.lab.twcu.ac.jp/~osada/math_model/math_model.pdf（参照：2021年1月10日）
- [12] 佐々木徹 (2004), 『拡散効果のある SIS 感染症モデルの局所対策について』, 岡山大学, <http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kyodo/kokyuroku/contents/pdf/1372-19.pdf>（参照：2021年1月10日）
- [13] M. Klompas et al. (2020), “Airborne Transmission of SARS-CoV-2: Theoretical Considerations and Available Evidence”, JAMA Network,

<https://jamanetwork.com/article.aspx?doi=10.1001/jama.2020.12458>

(参照：2020年11月28日)

[14] S. A. Lauer et al. (2020), 『The Incubation Period of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) From Publicly Reported Confirmed Cases: Estimation and Application』

National Center for Biotechnology Information,

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32150748/> (参照：2020年11月28日)

[15] unerry:【人流ビッグデータ×AIで見る新型コロナウイルスの影響:緊急事態宣言(4/7)による「外出自粛」への影響調査】 <https://www.unerry.co.jp/news/>

(参照：2020年12月12日)

[16] 構造計画研究所：artisoc マルチエージェント・シミュレーションプラットフォーム

<https://www.kke.co.jp/solution/theme/artisoc.html> (参照：2020年7月15日)

[17] AFP BB News：中国経済がV字回復 コロナ感染者は日本を下回り、15兆円経済支援が奏功 <https://www.afpbb.com/articles/-/3312646> (参照：2020年12月29日)