

Department of Policy and Planning Sciences

Discussion Paper Series

No.1374

パンデミックにおける感染者数と経済ダメージの

抑制に最適な人的移動制限率の検討

**(Optimal Rate of Mobility Restriction to Control the Number
of Infected People and Economic Damage in a Pandemic)**

by

栗栖慶太, 秋山英三

(Keita KURISU and Eizo AKIYAMA)

February 2021

UNIVERSITY OF TSUKUBA

Tsukuba, Ibaraki 305-8573
JAPAN

パンデミックにおける感染者数と経済ダメージの 抑制に最適な人的移動制限率の検討

Optimal Rate of Mobility Restriction to Control the Number of Infected People and Economic Damage in a Pandemic

栗栖 慶太^a, 秋山 英三^b

2021 年 2 月

概要

2020 年世界中で流行する新型コロナウイルスに対する感染拡大防止のための非薬学的介入政策の一つとして、移動制限政策が行われてきた。この移動制限政策の内容の決定において問題として挙げられるのが、「経済ダメージの抑制」と「感染の抑制」のトレードオフである。Bodenstein et al. (2020) [1] は、感染症数理モデル (SIR モデル) と経済への影響を予測するマクロ経済モデルを組み合わせて分析することにより、社会的距離政策が感染者数と経済へ与える影響を検証している。本研究は Bodenstein et al. (2020) [1] のモデル (1 地域のモデル) を 2 地域のモデルに拡張し、両地域間の移動を制限する政策が経済及び感染状況へ与える影響を分析した。具体的に、経済ダメージ及び感染者数の抑制に最適な移動制限率を検証した。分析の結果、2 地域間の移出入率が低いつまり労働者の行き来が少ない場合は、移動制限率が 100% の時 (ロックダウン実施時) に、最も経済ダメージが抑制されることがわかった。一方、2 地域間の移出入率が高いつまり労働者の行き来が多い場合は、移動制限率が高くなるほど経済ダメージは大きくなることがわかった。移出入率に関わらず最も感染者数が抑制されるのは移動制限率 100% の時であることがわかった。

キーワード: 移動制限政策, 経済のダメージ, 感染の抑制, パンデミック, 2 地域

^a 筑波大学理工学群社会学類 E-mail: kurisu.keita.tp@alumni.tsukuba.ac.jp

^b 筑波大学 システム情報系 E-Mail: eizo@sk.tsukuba.ac.jp

1 導入

2019 年末に中国湖北省武漢で発生した新型コロナウイルス (COVID-19) は、2020 年に世界中で大流行し各国に大きな被害をもたらしている。ワクチンなどが開発されていなかったこの新興感染症の感染拡大に対して世界各地で用いられてきた非薬学的介入政策の一つとして、移動制限政策が行われてきた。例えば、中国等は都市封鎖による徹底的な移動制限措置を行ってきた。一方、日本は 2020 年 6 月 19 日に緩和されるまで県をまたぐ移動の自粛という国民の自主性に依存した政策を行っており、政策の強制力は各国で異なっている。

人の移動には様々な目的があるが、とりわけ経済へ与える影響が大きいのは、労働者の移出入であると考えられる。地域間の労働者の移出入が多い場合と少ない場合では、経済に対する移動の重要性は異なると考えられる。労働者の移出入が多い地域間で何らかの影響により移動が制限されると、社会全体における労働供給量は減少し、経済活動への影響が甚大になる可能性がある。一方、労働者の移出入が少ない地域間で何らかの影響により移動が制限されると、社会全体における労働供給の減少量は比較的小さく済み、経済活動への影響は比較的小さくなる可能性がある。したがって、地域間の移出入率の違いは、移動制限政策による経済への影響を検証する上で、大きな影響を与えると推察される。

移動制限政策を決定する際には、「経済ダメージの抑制」と「感染の抑制」がトレードオフであることを考慮する必要がある。感染拡大を防止するためには、移動制限政策は効果が高いと考えられる。一方、移動制限措置が厳しくなると労働供給量にも影響を与え、社会全体の経済活動が停滞する恐れがある。移動制限に関する政策の意思決定においては以上のようなトレードオフを考慮することが求められる。

感染症拡大防止策の経済的影響を調査するには、感染症の流行を予測する疫学モデルと経済への影響を予測する経済モデルを用いる必要がある。Bodenstein et al. (2020) [1] は、SIR モデル^{*1}とマクロ経済モデルを組み合わせたモデルを用いることによって、社会的距離政策と感染者数の増減による労働供給量の増減^{*2}が、実質 GDP・消費・投資といった経済項目に与える影響を明らかにした。

Bodenstein et al. (2020) [1] は、社会的距離政策に伴う労働供給量の減少が経済へ与える影響は産業により異なることを勘案するため、全人口を産業別に 3 つの労働者グループ (それぞれグループ 1・グループ 2・グループ 3 とする) に分類している。グループ 1 は、医療や農林水産業といった専門的な技術が必要で労働者の欠勤を補うのが容易でない産業の労働者が属するグループである。グループ 2 はグループ 1 の対象外となる産業に属する労働者のグループである。グループ 3 は、若者や既に退職した者といった非労働者が属するグループである。Bodenstein et al. は、労働者グループごとに異なる接触制限政策 (社会的距離政策) を行う状況を仮定し、接触制限政策が感染者数及び経済ダメージへ与える影響を分析している。ここで、接触制限政策では、各グループで接触制限が行われる割合を規定している。分析の結果、中長期的な期間にわたる接触制限政策は感染者数の抑制にも経済ダメージの抑制にも効果があることが示している。とりわけ、グループ 1 の労働供給を極力維持しつつ、それ以外のグループの接触制限を重点的に行うことが感染者数の抑制にも経済ダメージの抑制にも重要であることを示している。一方、感染症が収束する前に制限を解除するような短期集中の接触制限政策は、例え接触制限率が高くても集中的な接触制限による大きな系竿ダメージと制限解除後の感染者数の増大の両方の面で望ましくないことを示している。以上のように Bodenstein et al. (2020) [1] のモデルでは感染者数と経済へのダメージを考慮しているが、閉鎖的な 1 地域での SIR モデルを用いているために、複数地域間の移動及び移動制限政策の影響を考慮することはできない。

Sattenspiel and Dietz (1995) [4] は、SIR モデルに複数地域間の移動を組み込み、複数地域における感染症の流行を予測するモデルを構築した。このモデルを用いることによって、複数地域における Susceptible・Infective・Removed の推移を各地域間の移動の影響を含めて予測することができる。このような複数地域間の移動の影響を含めて感染症の流行を予測した研究として、例えば次の 2 つの研究が挙げられる。Sattenspiel and Herring (2003) [5] は、1918 年及び 1919 年にカナダ中央部におけるインフルエンザの流行に関するデータを用いて、移動率の違い及び検疫が感染症の流行にどの

^{*1} SIR モデルとは、Kermack and McKendrick (1927) [2] にて提案された感染症の流行を予測する数理モデルとして代表的な常微分方程式を用いたモデルである。このモデルでは閉鎖的な 1 地域の全人口を Susceptible (感受性宿主でこれから感染する可能性のある人)・Infective (感染して感染性を有する状態の人)・Removed (感染後に回復して免疫を獲得した者) の 3 つの状態に分け、各状態の人数・割合の推移を予測する。

^{*2} 経済ショックには需要ショックと供給ショックの 2 種類ある [3]。需要ショックとは、労働ができなくなることにより所得を得られない消費者が、消費行動を減らすことによって生じる経済的影響を指す。供給ショックとは、営業の自粛を行うことで労働者が、生産活動を行えなくなることによって生じる経済的影響を指す。Bodenstein et al. (2020) [1] は労働者の減少による経済ショック、つまり供給ショックととらえている。

ように影響を与えるか分析している。Cosner et al. (2009) [6] は、蚊を媒介として人々の間で流行する感染症であるマラリアを想定し、地域間の移動がマラリアの流行にどのような影響を与えるか分析した。以上のように、複数地域間の移動の影響を含めた感染症の流行について、様々な研究が行われている。本研究では、新興感染症の流行における、地域間の移動及び移動制限が経済に与える影響についての分析を行う。

本研究の目的は、2地域間の移出入率の違いにおける移動制限政策の感染者数及び経済ダメージへの影響を明らかにすることである。Bodenstein et al. (2020) [1] をベースのモデルとし、さらに複数地域間の人々の移動を勘案する感染症の流行に関するモデルを提案している Sattenspiel and Dietz (1995) [4] のモデルを用いることで分析を行う。本研究では新興感染症のパンデミックに対する2地域間の移動制限政策が与える、感染者数の抑制効果と経済ダメージの抑制効果を比較し、経済活動をある程度保ちつつ感染拡大防止に寄与する移動制限政策を検討する。具体的には、2地域間の移出入率が高い場合・中程度の場合・低い場合の3つのシナリオを想定し、各シナリオにおいて移動制限率の変動が感染者数や経済ダメージ(実質 GDP へのダメージ)にどのように影響するかを検証する。

2 モデル

本研究では疫学モデルと経済モデルを組み合わせたモデルを用いて、感染症の流行時における経済への影響を分析する。1節で紹介する疫学モデルは SIR モデルに2地域間の移動を組み込んだモデルとなっており、そのモデルで得られた感染者の割合と移動を制限される人の割合をもとに労働供給量が決定される。2節で紹介する経済モデルでは、2セクターマクロ経済モデルを用い決定された労働供給量のもとで生産量つまり実質 GDP が決定される。3節では本研究における移動制限政策のモデル化や労働供給量の定義について説明する。移動制限政策や感染者の増加がどのように労働供給量に影響を与えるかをモデルの中で示す。4節ではモデルで用いるパラメータの定義・初期値の設定について説明する。パラメータの多くは Bodenstein et al. (2020) [1] を参考としている。

本研究では、2地域間の移動制限政策が感染者の割合と経済ダメージへの影響を検証する。本研究のモデルにおいて、症状あり感染者と移動制限された労働者は労働供給から除外される。2地域を地域 X と地域 Y とし、最初の感染者は地域 X で発生すると仮定する。2地域間の移出入率が高い場合・中程度の場合・低い場合のそれぞれの移動制限率について感染者の割合・経済ダメージの予測を行う。本研究では、シミュレーションを行うにあたって MATLAB を用いた数値計算を行った。Bodenstein et al. (2020) [1] と同様、Guerrieri and Iacoviello (2015) [7] にて提案された数値計算方法を用い、複雑なモデルの計算を可能とした。

2.1 疫学モデル

疫学モデルでは、新興感染症のパンデミックにおける感染者数の推移を時系列で予測する。感染症の流行を予測する数理モデルとして SIR モデルを用いられることが多いが、古典的な SIR モデルでは閉鎖された1地域における感染者数の予測を行っているため、複数地域における感染症の流行過程の予測を行うことはできない。この古典的な SIR モデルを派生させ、複数地域の感染症の流行の予測を可能としたのが Sattenspiel and Dietz (1995) [4] のモデルである。本研究ではこのモデルを用いて、複数地域における感染症の流行を予測する。

2.1.1 SIR モデル

古典的な SIR モデルは Kermack and McKendrick (1927) [2] にて提案された、常微分方程式を用いたモデルである。対象とする閉鎖された1地域の人口を Susceptible (S)・Infective (I)・Removed (R) の3つの状態に分けて検討し、S・I・R はそれぞれ全人口中の各状態を表す。それぞれの変数は Susceptible (感受性宿主でこれから感染する可能性のある者)・Infective (感染して感染性を有する状態の者)・Removed (感染後に回復して免疫を獲得した者)を表す。Removed には死亡者が含まれる場合もあるが、Bodenstein et al. (2020) [1] にならない本研究では重症者や死亡者を含めず、免疫を獲得した者のみとする。各状態の時間あたりの変化量は常微分方程式によって、式 (1), (2), (3) のように与えられる。それぞれの式は S・I・R の各変数の変化量を表しており、 β は接触感染率 (S と I が接触したときの感染率)、 γ は回復率 (または隔離率) である。

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI \quad (2.1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I \quad (2.2)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I \quad (2.3)$$

基本再生産数 \mathcal{R}_0 とは、1 人の感染者が何人に感染させるかを示す指標である。各変数の初期値をそれぞれ $S(0), I(0), R(0)$ とすると、基本再生産数は $\mathcal{R}_0 = \frac{\beta S(0)}{\gamma}$ と定義され、以下のように導出される。

$$\frac{dI}{dt}(0) = \beta S(0)I(0) - \gamma I(0) = I(0)(\beta S(0) - \gamma) \quad (2.4)$$

$\frac{dI}{dt}(0)$ は最初の感染者の変化量、つまり最初の感染者を除き全員が Susceptible つまり免疫を持っておらず感染する可能性がある集団の中で、その感染者がどのくらい感染させるかを示している。 $\mathcal{R}_0 = \frac{\beta S(0)}{\gamma} > 0$ の時、 $\frac{dI}{dt}(0) > 0$ となり感染症は流行する。 $\mathcal{R}_0 = \frac{\beta S(0)}{\gamma} < 0$ の時、 $\frac{dI}{dt}(0) < 0$ となり感染症は流行しない。

本研究では Bodenstein et al. (2020)[1] を参考に、パラメータである接触感染率 β と回復率 γ は $\beta = 0.2, \gamma = 0.05$ と設定し、 $\frac{\beta}{\gamma} = 4$ となっているため、感染症は流行する。初期値を $S(0) = 0.9999, I(0) = 0.0001, R(0) = 0$ と設定した場合、各状態の変数の推移は図 2.1 のようになる。

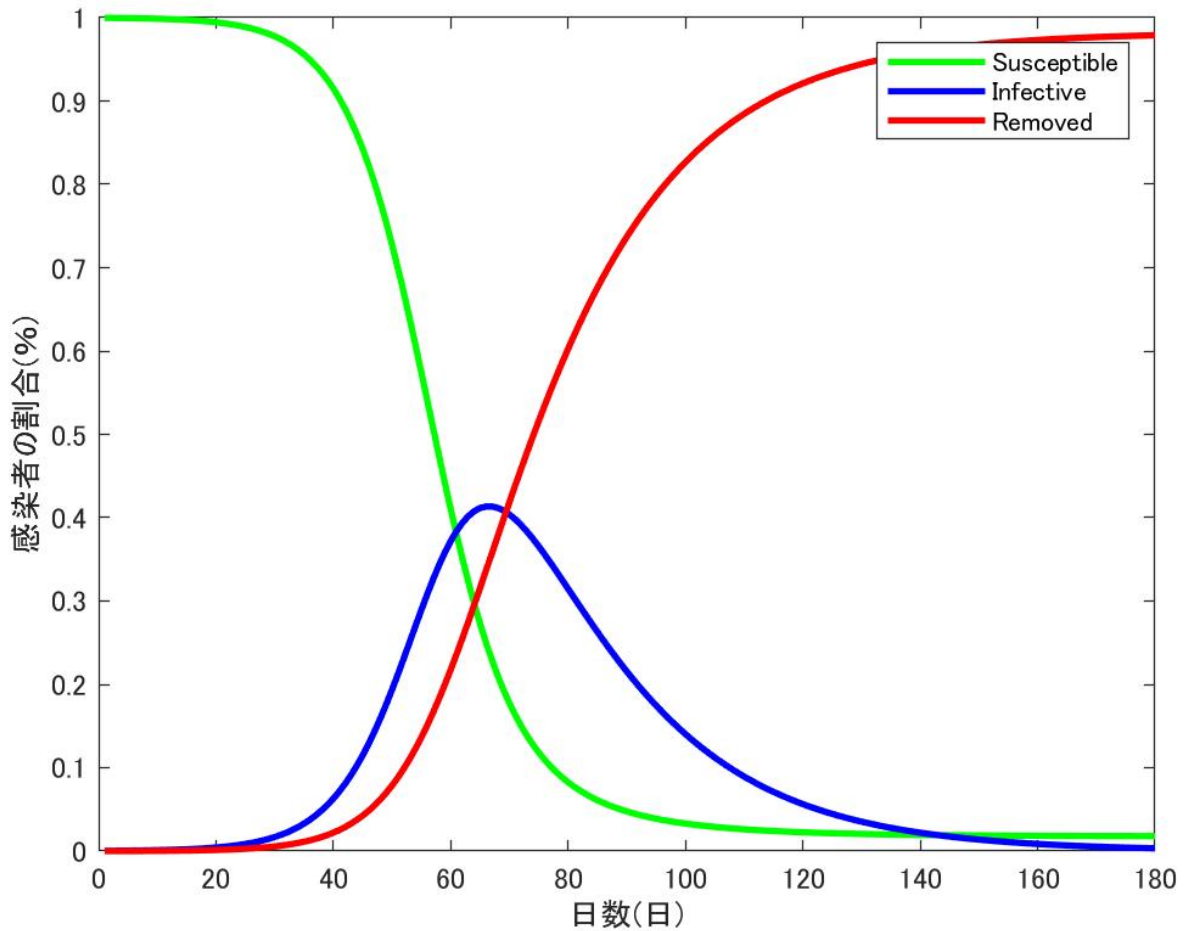


図 2.1: SIR モデルのダイナミクス

2.1.2 移動を組み込んだ SIR モデル

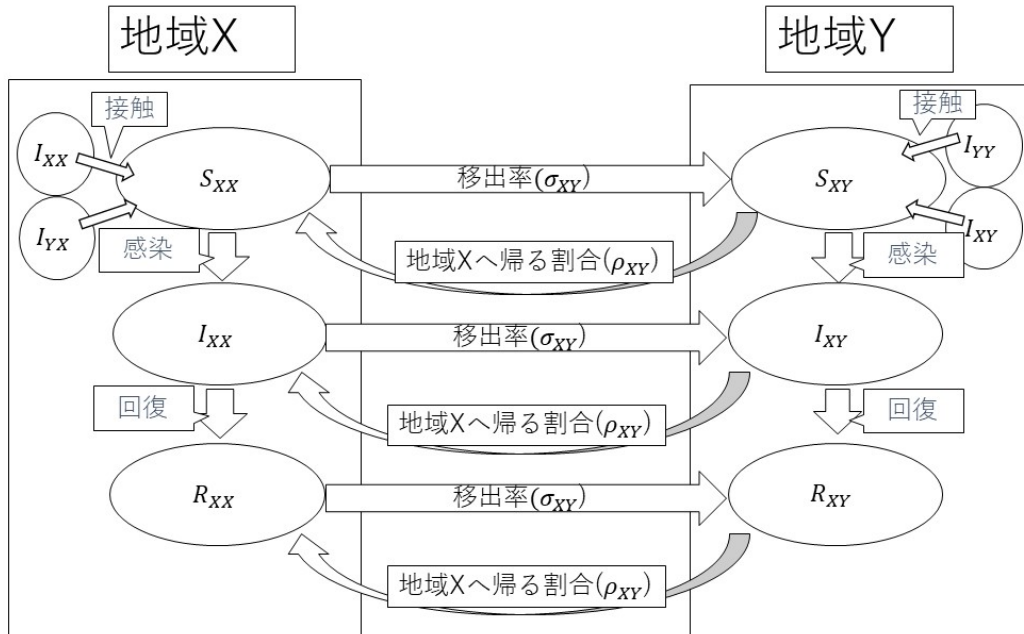


図 2.2: 移動を組み込んだ SIR モデルにおける地域 X 出身者の概観

古典的な SIR モデルは 1 地域の閉鎖人口を仮定しているため、複数地域間の移動の影響を組み込んだ感染者数の推移を予測するのは不可能である。Sattenspiel and Dietz (1995) [4] は、SIR モデルを、複数地域間の移動の影響を考慮する形で拡張したモデルを提案している。本研究では Sattenspiel and Dietz (1995) [4] の手法を取り入れ、2 地域を仮定する。2 地域は以下地域 X 及び地域 Y と呼ぶこととする。

初期状態に地域 X に滞在している者を「地域 X 出身者」とし、地域 Y に滞在している者を「地域 Y 出身者」とする。地域 X 出身で地域 X に滞在している Susceptible(感受性宿主)を S_{XX} と表し、地域 X 出身で地域 Y に滞在している Susceptible を S_{XY} と表す。移出入率と接触感染率に関して、パラメータを表 2.1 のように定義する。

表 2.1: 移出入率と接触感染率に関してのパラメータ

	定義
ρ_{ij}	出身地域でない地域に移動している人の内、それぞれの出身地域に戻る割合。 (ただし、Infective つまり症状あり感染者は含まれない。) 添え字は左から出身地域 (i)・移動している他地域 (j) となっている。 例えば、 ρ_{XY} は地域 X 出身者で地域 Y に移動している人の内、地域 X に戻る割合。
σ_{ij}	自らの出身地域に滞在している人の内、他地域に移出する割合。 (ただし、Infective つまり症状あり感染者は含まれない。) 添え字は左から出身地域 (i)・移動する他地域 (j) となっている。 例えば、 σ_{XY} は地域 X 出身者で地域 X に滞在している人の内、地域 Y に移出する割合。
β_{ijk}	Susceptible と Infective が接触した時の接触感染率。 添え字は左から Susceptible の出身地 (i)・Infective の出身地 (j)・接触する場所 (k) を表している。 例えば、 β_{XYX} は地域 X における、 S_{XX} と I_{YX} の接触感染率。

図 2.2 は移動を組み込んだ SIR モデルにおける地域 X 出身者の概観である。地域 X 出身の地域 X に滞在する Susceptible つまり S_{XX} は、 I_{XX} または I_{YX} と接触し感染すると I_{XX} となる。回復すると I_{XX} は R_{XX} となる。 S_{XX}, I_{XX}, R_{XX} は地域 Y に σ_{XY} の割合で移出し、それぞれ S_{XY}, I_{XY}, R_{XY} となる。地域 X 出身の地域 Y に滞在する Susceptible つまり S_{XY} は、 I_{XY} または I_{YY} と接触し感染すると I_{XY} となる。回復すると I_{XY} は R_{XY} となる。地域 Y に移出した地域 X 出身者 S_{XY}, I_{XY}, R_{XY} はそれぞれ ρ_{XY} の割合で地域 X へと戻り、 S_{XX}, I_{XX}, R_{XX} となる。 S_{XX} の変化量は以下のように定義される。

$$S_{XX} \text{ の変化量} = S_{XY} \text{ の内地域 } X \text{ に戻る人} - S_{XX} \text{ の内地域 } Y \text{ へ移出する人} - S_{XX} \text{ の新規感染者} \quad (2.5)$$

S_{XX} の変化量は数式に表すと、式 (4) のようになる。

$$\frac{dS_{XX}}{dt} = \rho_{XY} S_{XY} - \sigma_{XY} S_{XX} - (\beta_{XYX} S_{XX} I_{YX} + \beta_{XXX} S_{XX} I_{XX}) \quad (2.6)$$

S_{XY} つまり地域 X 出身で地域 Y に滞在している Susceptible の変化量は以下のように定義される。

$$S_{XY} \text{ の変化量} = S_{XX} \text{ の内地域 } Y \text{ へ移出する人} - S_{XY} \text{ の内地域 } X \text{ に戻る人} - S_{XY} \text{ の新規感染者} \quad (2.7)$$

S_{XY} の変化量は数式に表すと、式 (5) のようになる。

$$\frac{dS_{XY}}{dt} = \sigma_{XY} S_{XX} - \rho_{XY} S_{XY} - (\beta_{XXY} S_{XY} I_{XY} + \beta_{XYY} S_{XY} I_{YY}) \quad (2.8)$$

以上のように出身地域・滞在地域ごとの Susceptible・Infective・Removed を定義する。以下の数式が X 地域出身者の各変数の変化量となっている。

$$\frac{dS_{XX}}{dt} = \rho_{XY} S_{XY} - \sigma_{XY} S_{XX} - (\beta_{XYX} S_{XX} I_{YX} + \beta_{XXX} S_{XX} I_{XX}) \quad (2.9)$$

$$\frac{dS_{XY}}{dt} = \sigma_{XY} S_{XX} - \rho_{XY} S_{XY} - (\beta_{XXY} S_{XY} I_{XY} + \beta_{XYY} S_{XY} I_{YY}) \quad (2.10)$$

$$\frac{dI_{XX}}{dt} = \rho_{XY} I_{XY} - \sigma_{XY} I_{XX} + (\beta_{XYX} S_{XX} I_{YX} + \beta_{XXX} S_{XX} I_{XX}) - \gamma I_{XX} \quad (2.11)$$

$$\frac{dI_{XY}}{dt} = \sigma_{XY} I_{XX} - \rho_{XY} I_{XY} + (\beta_{XXY} S_{XY} I_{XY} + \beta_{XYY} S_{XY} I_{YY}) - \gamma I_{XY} \quad (2.12)$$

$$\frac{dR_{XX}}{dt} = \rho_{XY} R_{XY} - \sigma_{XY} R_{XX} + \gamma I_{XX} \quad (2.13)$$

$$\frac{dR_{XY}}{dt} = \sigma_{XY} R_{XX} - \rho_{XY} R_{XY} + \gamma I_{XY} \quad (2.14)$$

以下 Y 地域出身者の各変数の変化量も同様に以下のように定義される。

$$\frac{dS_{YY}}{dt} = \rho_{YX} S_{YX} - \sigma_{YX} S_{YY} - (\beta_{YXY} S_{YY} I_{XY} + \beta_{YYY} S_{YY} I_{YY}) \quad (2.15)$$

$$\frac{dS_{YX}}{dt} = \sigma_{YX} S_{YY} - \rho_{YX} S_{YX} - (\beta_{YYX} S_{YX} I_{YX} + \beta_{YXX} S_{YX} I_{XX}) \quad (2.16)$$

$$\frac{dI_{YY}}{dt} = \rho_{YX} I_{YX} - \sigma_{YX} I_{YY} + (\beta_{YXY} S_{YY} I_{XY} + \beta_{YYY} S_{YY} I_{YY}) - \gamma I_{YY} \quad (2.17)$$

$$\frac{dI_{YX}}{dt} = \sigma_{YX}I_{YY} - \rho_{YX}I_{YX} + (\beta_{Y Y X}S_{YX}I_{YX} + \beta_{Y X X}S_{YX}I_{X X}) - \gamma I_{YX} \quad (2.18)$$

$$\frac{dR_{YY}}{dt} = \rho_{YX}R_{YX} - \sigma_{YX}R_{YY} + \gamma I_{YY} \quad (2.19)$$

$$\frac{dR_{YX}}{dt} = \sigma_{YX}R_{YY} - \rho_{YX}R_{YX} + \gamma I_{YX} \quad (2.20)$$

パラメータである接触感染率 β と回復率 γ は先ほどと同様, $\beta_{XXX} = \beta_{XYX} = \beta_{YYX} = \beta_{YXX} = \beta_{XXY} = \beta_{XYY} = \beta_{YYX} = \beta_{YXY} = 0.2, \gamma = 0.05$ と設定する. 移出入をモデルに導入することの影響を可視化しやすくするために, 移出入に関するパラメータは低い移出入率とし, $\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.001, \rho_{XY} = \rho_{YX} = 1$ と設定する. これは, 平成 27 年に総務省統計局が行った国勢調査にて発表された, 「他都道府県が従業地・通学地である人口の割合」が低い都道府県である北海道 (0.2%)・沖縄県 (0.2%) の値を参考にしている. 最初の感染者は地域 X で発生しているものとする, 初期値を $S_{XX} = 0.9999, S_{XY} = 0, I_{XX} = 0.0001, I_{XY} = 0, R_{XX} = 0, R_{XY} = 0, S_{YY} = 1, S_{YX} = 0, I_{YY} = 0, I_{YX} = 0, R_{YY} = 0, R_{YX} = 0$ と設定される. 感染者の割合の推移は図 2.3 のようになる.

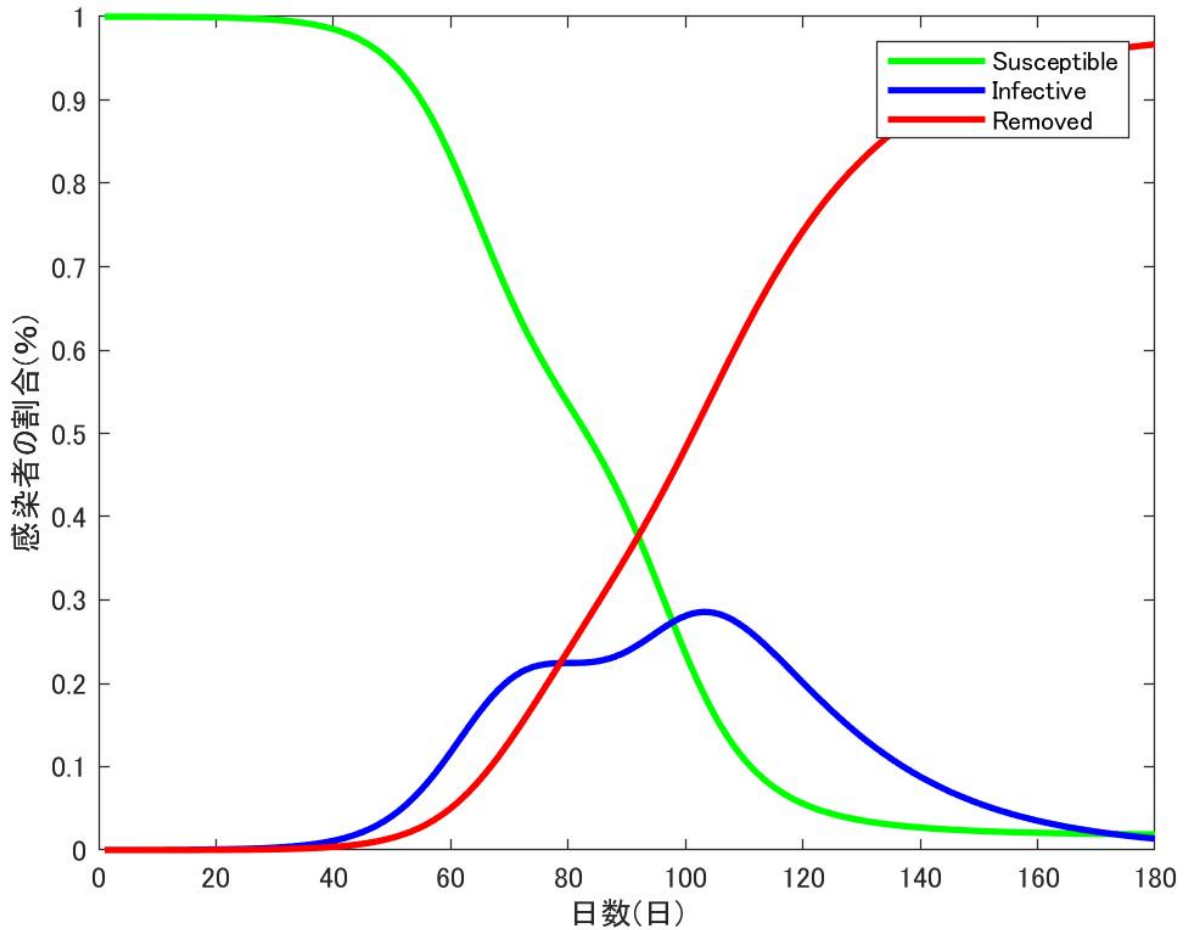


図 2.3: 移動を組み込んだ SIR モデルのダイナミクス

2.1.3 無症状感染者を含めた疫学モデル

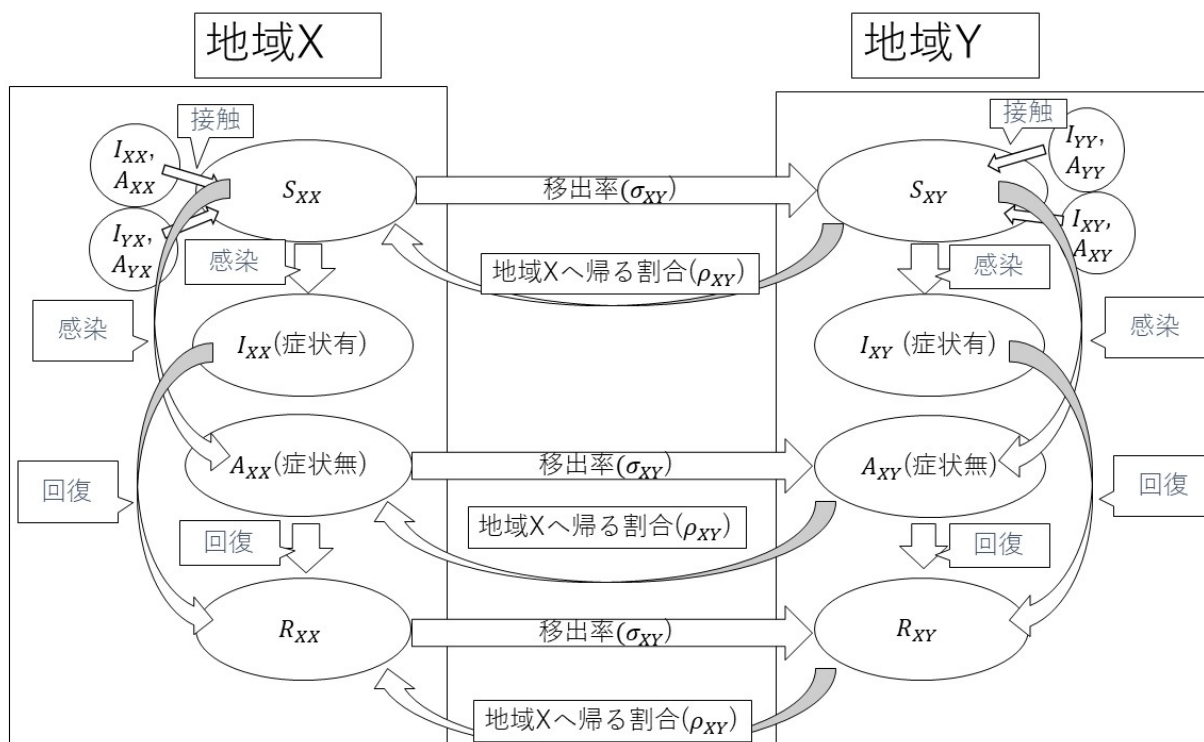


図 2.4: 無症状感染者を含めた疫学モデルにおける地域 X 出身者の概観

本研究では, Ianni and Rossi (2020) [9] にて提案された, 無症状感染者^{*3}を含めた疫学モデルを応用する. 症状あり感染者を I , 無症状感染者を A (Asymptomatic) とする. β_I, γ_I を症状あり感染者の接触感染率と回復率, β_A, γ_A を無症状感染者の接触感染率と回復率と定義する. 古典的な SIR モデルに無症状感染者を含めたモデルは以下のようなになる.

$$\frac{dS}{dt} = -\beta_I SI - \beta_A SA \quad (2.21)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta_I SI - \gamma_I I \quad (2.22)$$

$$\frac{dA}{dt} = \beta_A SA - \gamma_A A \quad (2.23)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma_I I + \gamma_A A \quad (2.24)$$

このモデルの特徴は, 症状あり感染者が無症状感染者になることや, 無症状感染者が症状あり感染者になることがない点である. 感受性保持者は感染すると症状あり感染者もしくは無症状感染者となり, その後回復する.

感染者のうち無症状感染者の割合を ι とし, 移動を組み込んだ SIR モデルに導入する. 接触感染率が β の時, 症状あり感染者の接触感染率は $\beta_I = (1 - \iota)\beta$, 無症状感染者の接触感染率は $\beta_A = \iota\beta$ と書き換えることができる. 2 節で紹介した移動を組み込んだ SIR モデルでは, 感染者は症状の有無にかかわらず, 地域間を移動することができた. 感染者を症状ありと無症状に分類するにあたって, 症状あり感染者は移動不可及び無症状感染者は移動可能という仮定を導入する.

^{*3} Lavezzo et al. (2020) [8] によると, 新型コロナウイルスの信頼できる医学的検査で検出された感染者の中で, 無症状感染者が多くの割合を占める可能性があることが示された. 症状のある感染者は症状を発症し感染性を持つ (他人に感染させる) のに対し, 無症状感染者とは症状の発症はなくても感染性を持つ感染者のことである.

図 2.4 は移動を組み込んだ SIR モデルにおける地域 X 出身者の概観である。地域 X 出身の地域 X に滞在する Susceptible つまり S_{XX} は、 I_{XX} , I_{YX} , A_{XX} , A_{YX} と接触し感染すると $(1 - \iota)$ の割合で I_{XX} となり ι の割合で A_{XX} となる。回復すると I_{XX} , A_{XX} は R_{XX} となる。 S_{XX} , A_{XX} , R_{XX} は地域 Y に σ_{XY} の割合で移出し、それぞれ S_{XY} , A_{XY} , R_{XY} となる。地域 X 出身の地域 Y に滞在する Susceptible つまり S_{XY} は、 I_{YY} , I_{XY} , A_{YY} , A_{XY} と接触し感染すると $(1 - \iota)$ の割合で I_{XY} となり ι の割合で A_{XY} となる。回復すると I_{XY} , A_{XY} は R_{XY} となる。地域 Y に移出した地域 X 出身者 S_{XY} , A_{XY} , R_{XY} はそれぞれ ρ_{XY} の割合で地域 X へと戻り、 S_{XX} , A_{XX} , R_{XX} となる。 $\gamma = \gamma_I = \gamma_A$ とすると、例えば X 地域出身者の移動を組み込んだ SIR モデルに以下のように導入することができる。

$$\frac{dS_{XX}}{dt} = \rho_{XY}S_{XY} - \sigma_{XY}S_{XX} - \{\beta_{XYX}S_{XX}(I_{YX} + A_{YX}) + \beta_{XXX}S_{XX}(I_{XX} + A_{XX})\} \quad (2.25)$$

$$\frac{dS_{XY}}{dt} = \sigma_{XY}S_{XX} - \rho_{XY}S_{XY} - \{\beta_{XXY}S_{XY}(I_{XY} + A_{XY}) + \beta_{YYX}S_{XY}(I_{YY} + A_{YY})\} \quad (2.26)$$

$$\frac{dI_{XX}}{dt} = (1 - \iota)\{\beta_{XYX}S_{XX}(I_{YX} + A_{YX}) + \beta_{XXX}S_{XX}(I_{XX} + A_{XX})\} - \gamma I_{XX} \quad (2.27)$$

$$\frac{dI_{XY}}{dt} = (1 - \iota)\{\beta_{XXY}S_{XY}(I_{XY} + A_{XY}) + \beta_{YYX}S_{XY}(I_{YY} + A_{YY})\} - \gamma I_{XY} \quad (2.28)$$

$$\frac{dA_{XX}}{dt} = \rho_{XY}A_{XY} - \sigma_{XY}A_{XX} + \iota\{\beta_{XYX}S_{XX}(I_{YX} + A_{YX}) + \beta_{XXX}S_{XX}(I_{XX} + A_{XX})\} - \gamma A_{XX} \quad (2.29)$$

$$\frac{dA_{XY}}{dt} = \sigma_{XY}A_{XX} - \rho_{XY}A_{XY} + \iota\{\beta_{XXY}S_{XY}(I_{XY} + A_{XY}) + \beta_{YYX}S_{XY}(I_{YY} + A_{YY})\} - \gamma A_{XY} \quad (2.30)$$

$$\frac{dR_{XX}}{dt} = \rho_{XY}R_{XY} - \sigma_{XY}R_{XX} + \gamma I_{XX} + \gamma A_{XX} \quad (2.31)$$

$$\frac{dR_{XY}}{dt} = \sigma_{XY}R_{XX} - \rho_{XY}R_{XY} + \gamma I_{XY} + \gamma A_{XY} \quad (2.32)$$

パラメータである接触感染率 β と回復率 β は先ほどと同様、 $\beta = \beta_{XXX} = \beta_{XYX} = \beta_{YYX} = \beta_{YXX} = \beta_{XXY} = \beta_{XXY} = \beta_{YYX} = \beta_{YXY} = 0.2, \gamma = 0.05$ と設定し、Bodenstein et al. (2020) [1] にならい感染者のうちの無症状感染者の割合を $\iota = 0.4$ と定める。移出入に関するパラメータを $\sigma_{AB} = \sigma_{BA} = 0.001, \rho_{AB} = \rho_{BA} = 1$ と設定する。地域 X で最初の感染者が発生しているとし、 $S_{XX} = 0.9999, S_{XY} = 0, I_{XX} = 0.00005, I_{XY} = 0, A_{XX} = 0.00005, A_{XY} = 0, R_{XX} = 0, R_{XY} = 0, S_{YY} = 1, S_{YX} = 0, I_{YY} = 0, I_{YX} = 0, A_{YY} = 0, A_{YX} = 0, R_{YY} = 0, R_{YX} = 0$ と設定すると感染者の割合の推移は図 2.5 のようになる。

上述の疫学モデルと平行して本研究では、マクロ経済モデルの分析を行う。

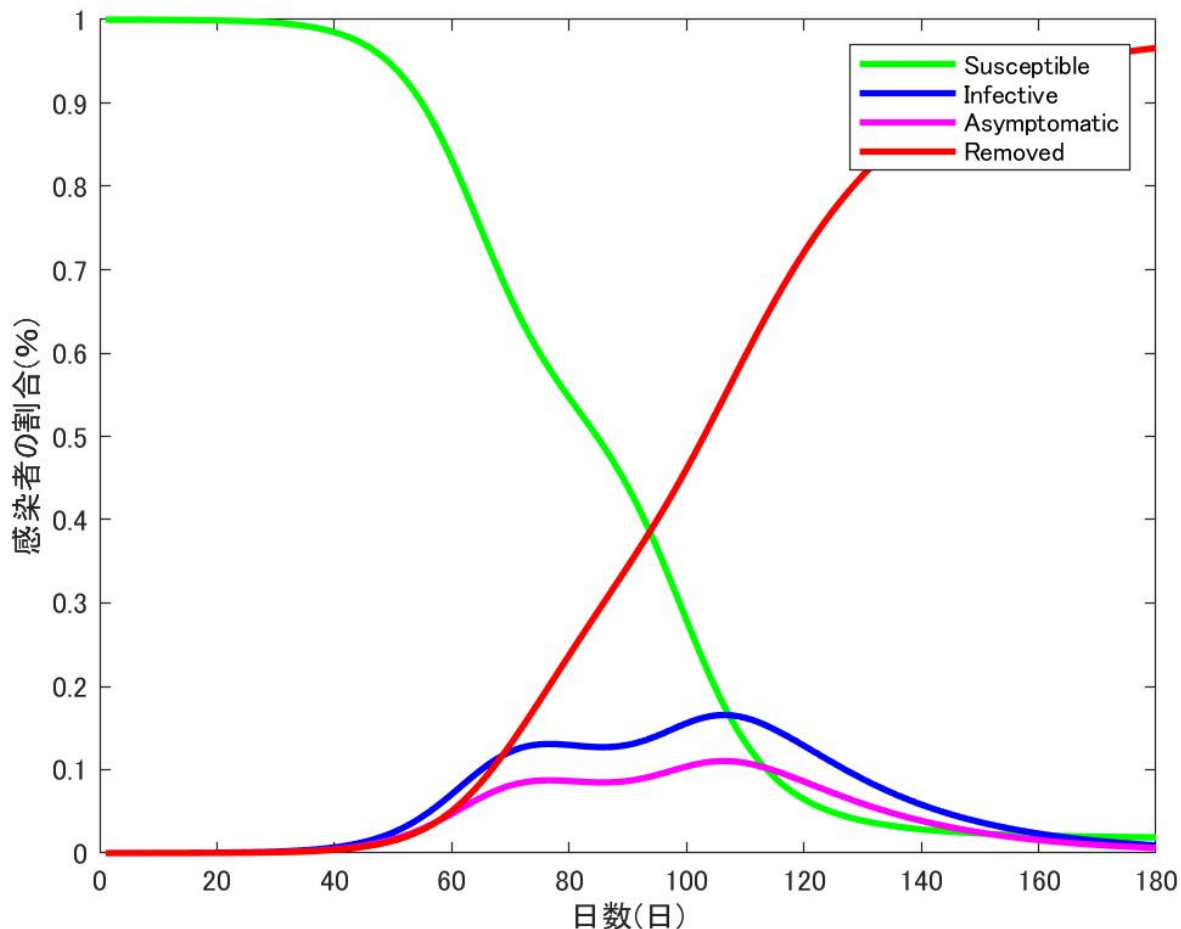


図 2.5: 無症状感染者を加えた移動を組み込んだ SIR モデルのダイナミクス

2.2 マクロ経済モデル

マクロ経済モデルは疫学モデルで把握した感染症の流行と、感染防止策により変動した労働供給量による GDP への影響を明らかにする。ベースとなるモデルは Bodenstein et al. (2020) [1] であり、このモデルでは全人口を 3 つのグループに分類する。グループ 1 は農林水産業・医療・運輸業など専門的な技術が必要で労働者の欠勤を補うのが容易でなく、労働供給量の減少で経済に大きな影響を及ぼす産業の労働者グループであり、このグループ 1 の労働者が労働を供給する産業をセクター 1 とする。例えば医療サービスにおいて、資格が必要な医者や看護師の欠勤はそれを補うための調整が難しい。グループ 2 はグループ 1 に比べると経済に大きな影響を及ぼさない労働者グループであり、このグループの労働者はセクター 2 に労働を供給する。グループ 3 は非労働力であり、すでに退職した人や若者が含まれる。グループ 1・グループ 2・グループ 3 の割合をそれぞれ N_1 , N_2 , N_3 とする。

本研究にて移動制限政策の経済への影響を示すにあたって、地域間の移動を制限された人や症状ありの感染者は労働することができない、つまりリモートワークによる労働はできないという仮定をおく。これにより、労働供給の減少量は、移動制限により労働ができなくなった労働者と症状ありの感染によって労働ができなくなった労働者によるものとなる。パラメータは Bodenstein et al. (2020) [1] に基づき定める。

2.2.1 生産関数

t 期の最終財 y_t の生産関数は以下のような 2 要素 CES 生産関数となっている。

$$y_t = ((1 - \omega)^{\frac{\tau}{1+\tau}} (v_{1,t})^{\frac{1}{1+\tau}} + \omega^{\frac{\tau}{1+\tau}} (v_{2,t})^{\frac{1}{1+\tau}})^{1+\tau} \quad (2.33)$$

ω は分配パラメータであり、中間財の $v_{1,t}$ と $v_{2,t}$ の最終財への影響度合いを表すパラメータである。 τ は代替の弾力性であり、生産量を一定にするのに生産要素を他の生産要素により代替することの容易さを示す尺度である。

2.2.2 セクター 1 の中間財の生産

実質 GDP は最終財の生産量によって定義づけられ、最終財はグループ 1 とグループ 2 の労働者が t 期に生産する中間財 (それぞれ $v_{1,t}$, $v_{2,t}$) によって決定される。グループ 1 の労働者が労働供給する中間財の生産関数は以下ようになる。

$$v_{1,t} = \eta(l_{1,t} - \chi) \quad (2.34)$$

η は生産をコントロールするパラメータ、 χ は最低の労働供給量の大きさを定めるパラメータである。セクター 1 は労働供給量の減少による生産量へのダメージが大きいため、資本が労働供給量の不足を補えないものとし、労働供給量 $l_{1,t}$ によってのみ中間財の生産量は変動するというモデルになっている。セクター 1 の中間財の生産には労働者の欠勤を補うのが困難であるため、 χ によって最低の労働供給量の大きさを定める。 η は、 χ による労働供給量からの差し引きを調整するパラメータである。本研究にてこれらのパラメータは $\eta = 2$, $\chi = \frac{N_1}{2}$ と定める。

η , χ の具体的な役割について説明する。例えば、 t 期にグループ 1 の労働者が供給する労働供給量を $l_{1,t} = N_1$ とする。何らかの労働供給ショックの影響で労働供給量が a 減少する時、中間財の生産量は $v_{1,t} = 2 \left\{ (N_1 - a) - \frac{N_1}{2} \right\} = N_1 - 2a$ である。労働供給ショックがない場合の中間財の生産は $v_{1,t} = 2 \left(N_1 - \frac{N_1}{2} \right) = N_1$ であるので、それに対するショックを受けた時の労働供給の割合が $\frac{N_1 - a}{N_1}$ であるのに対し、ショックを受けた中間財の生産量の割合は $\frac{N_1 - 2a}{N_1}$ となっていることがわかる。以上より、パラメータ η , χ を定めることで、労働供給量へのダメージが、中間財の生産に労働供給量以上にダメージを与えていることがわかる。

2.2.3 セクター 2 の中間財の生産

グループ 1 の中間財の生産関数は以下のようなコブダグラス型生産関数となっている。

$$v_{2,t} = (u_t k_{t-1}^\alpha) l_{2,t}^{1-\alpha} \quad (2.35)$$

労働供給量 $l_{2,t}$ と設備稼働率 u_t と資本 k_{t-1} により中間財 $v_{2,t}$ の生産量は変動する。 α はセクター 2 における資本の分配のパラメータであり、 $\alpha = 0.3$ と定める。 α が大きいほど資本 k_{t-1} が中間財 $v_{2,t}$ の生産量に与える影響が大きくなり、 α が小さいほど資本 k_{t-1} が中間財 $v_{2,t}$ の生産量に与える影響が小さくなるようなパラメータである。

2.2.4 家計

家計は以下の効用を最大化するように各期 t の $\{c_{t+i}, i_{t+i}, k_{t+i}, u_{t+i}\}_{i=0}^\infty$ を選ぶ。

$$U_t = E_t \sum_{i=0}^{\infty} \theta^i \log(c_{t+i} - \kappa c_{t+i-1}) \quad (2.36)$$

c_t , i_t , k_t , u_t はそれぞれ、 t 期の消費・投資・資本・資本稼働率である。効用最大化するような各期 t の $\{c_{t+i}, i_{t+i}, k_{t+i}, u_{t+i}\}_{i=0}^\infty$ の選択とは、家計は t 期から先の無限期間つまり生涯の効用を最大化するように消費・投資・資本・資本稼働率を選択することである。 θ は 1 か月あたりの割引率であり、つまり θ^i は i 期 (i か月) 先の将来の価値を現在の価値に換算するパラメータである。 E_t は期待値オペレータ、つまり U_t は $\sum_{i=0}^{\infty} \theta^i \log(c_{t+i} - \kappa c_{t+i-1})$ の期待値であるということである。 κ は消費の習慣形成の強度を示すパラメータであり、 $t+i$ 期には $t+i-1$ 期の消費に対して、つまり過去の消費に対してある水準以上の消費を行わなければ効用を得られないというパラメータである。家計の予算制約式は以下である。

$$c_t + i_t = w_{1,t} l_{1,t} + w_{2,t} l_{2,t} + r_{k,t} u_t k_{t-1} - \nu_0 \frac{u_t^{1+\nu}}{1+\nu} \quad (2.37)$$

$w_{1,t}, w_{2,t}$ はそれぞれグループ 1 ・グループ 2 の労働者の賃金である。 t 期のセクター 1 の生産する中間財の価格 $p_{1,t}$ を以下のように定義する。

$$p_{1,t} = \left(\frac{(1-\omega)y}{v_{1,t}} \right)^{\frac{\tau}{1+\tau}} \quad (2.38)$$

$w_{1,t}, w_{2,t}$ は次のように定義される.

$$w_{1,t} = \eta p_{1,t} = \eta \left(\frac{(1-\omega)y}{v_{1,t}} \right)^{\frac{\tau}{1+\tau}} \quad (2.39)$$

$$w_{2,t} = (1-\alpha) \left(\omega \frac{y_t}{v_{2,t}} \right)^{\frac{\tau}{1+\tau}} \frac{v_{2,t}}{l_{2,t}} \quad (2.40)$$

$r_{k,t}$ は t 期の資本財のリターンであり, 家計は資本をセクター 2 に貸し出すことで $r_{k,t}$ の割合で利益を得ている. $\nu_0 \frac{u_t^{1+\nu}}{1+\nu}$ は資本利用による調整コストであり, ν_0 は定常状態において資本稼働率を 1 にするパラメータ, ν は生産能力の弾力性のパラメータである. 定常状態における資本財のリターン・資本をそれぞれ r_k, k とすると, $\nu_0 = r_k k$ である. 家計は労働を行うことによる賃金・資本財のリターン・資本利用による調整コストによって所得が決まり, 消費と投資に用いている.

資本 k_t の蓄積は, i_t を各期の投資として, δ の減価償却を仮定する.

$$k_t = (1-\delta)k_{t-1} + i_t \quad (2.41)$$

投資の閾値は以下のようなになる. i は定常状態における投資, ϕ は資本の可逆性を示し, $\phi = 0$ の時, 以下の式は資本が不可逆であることを示す.

$$i_t \geq \phi i \quad (2.42)$$

2.3 移動制限政策と労働供給量

本研究では2地域間の移動に対して移動制限率を設定する．移動制限率を r とすると地域間を移出入する人のうち、移動制限されない割合は $(1-r)$ となる．移動制限政策が行われている中での移出入率は、この $(1-r)$ と $\rho_{XY}, \rho_{YX}, \sigma_{XY}, \sigma_{YX}$ の積で設定される．本研究では、単純化のためにモデル上地域間を移動する人全てに、移動制限を一律に行うという仮定をしている．

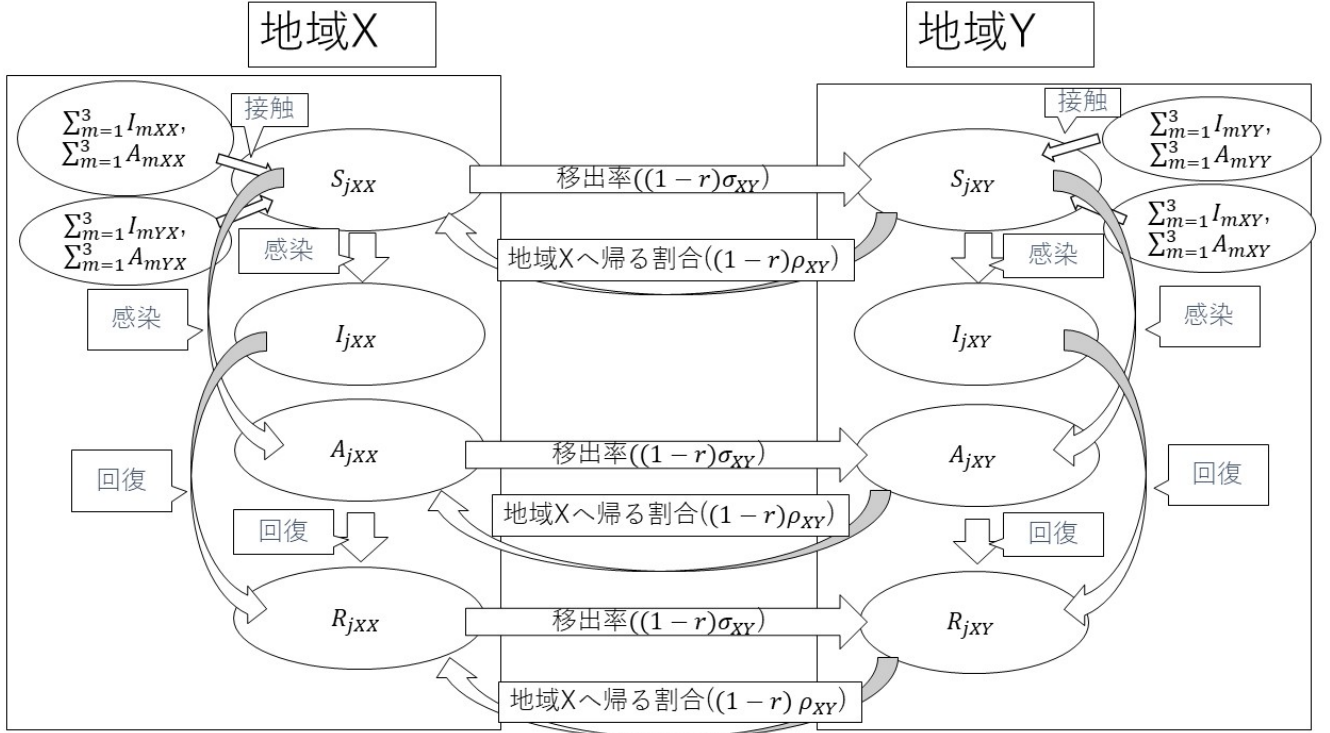


図 2.6: 移動制限政策による地域 X 出身者のグループ j の概観

本研究における各移出入率の移動制限政策は、地域間の移動を制限された人の接触は制限されず、滞在地域にて他人との接触が可能である．この場合、地域間の移動は制限されるが外出は制限されないというような状況となり、感染する可能性や感染させる可能性がある．政策としては移動に制限がかかるのみであり、地域 X 出身のグループ j ($j = 1, 2, 3$) に関する疫学モデルは以下ようになる．

$$\frac{dS_{jXX}}{dt} = (1-r)\rho_{XY}S_{jXY} - (1-r)\sigma_{XY}S_{jXX} - \sum_{m=1}^3 \{ \beta_{XYX}S_{jXX}(I_{mYX} + A_{mYX}) + \beta_{XXX}S_{jXX}(I_{mXX} + A_{mXX}) \} \quad (2.43)$$

$$\frac{dS_{jXY}}{dt} = (1-r)\sigma_{XY}S_{jXX} - (1-r)\rho_{XY}S_{jXY} - \sum_{m=1}^3 \{ \beta_{XXY}S_{jXY}(I_{mXY} + A_{mXY}) + \beta_{YYX}S_{jXY}(I_{mYY} + A_{mYY}) \} \quad (2.44)$$

$$\frac{dI_{jXX}}{dt} = \sum_{m=1}^3 (1-\iota) \{ \beta_{XYX}S_{jXX}(I_{mYX} + A_{mYX}) + \beta_{XXX}S_{jXX}(I_{mXX} + A_{mXX}) \} - \gamma I_{jXX} \quad (2.45)$$

$$\frac{dI_{jXY}}{dt} = \sum_{m=1}^3 (1-\iota) \{ \beta_{XXY}S_{jXY}(I_{mXY} + A_{mXY}) + \beta_{YYX}S_{jXY}(I_{mYY} + A_{mYY}) \} - \gamma I_{jXY} \quad (2.46)$$

$$\frac{dA_{jXX}}{dt} = (1-r)\rho_{XY}A_{jXY} - (1-r)\sigma_{XY}A_{jXX} + \sum_{m=1}^3 \iota\{\beta_{XX}S_{jXX}(I_{mYX} + A_{mYX}) + \beta_{XX}S_{jXX}(I_{mXX} + A_{mXX})\} - \gamma A_{jXX} \quad (2.47)$$

$$\frac{dA_{jXY}}{dt} = (1-r)\sigma_{XY}A_{jXX} - (1-r)\rho_{XY}A_{jXY} + \sum_{m=1}^3 \iota\{\beta_{XY}S_{jXY}(I_{mXY} + A_{mXY}) + \beta_{XY}S_{jXY}(I_{mYY} + A_{mYY})\} - \gamma A_{jXY} \quad (2.48)$$

$$\frac{dR_{jXX}}{dt} = (1-r)\rho_{XY}R_{jXY} - (1-r)\sigma_{XY}R_{jXX} + \gamma I_{jXX} + \gamma A_{jXX} \quad (2.49)$$

$$\frac{dR_{jXY}}{dt} = (1-r)\sigma_{XY}R_{jXX} - (1-r)\rho_{XY}R_{jXY} + \gamma I_{jXY} + \gamma A_{jXY} \quad (2.50)$$

本研究において労働が不可能とされる人は、症状のある感染者と各地域間の移動を制限される人である。労働供給の減少量は、症状のある感染者数と移動を制限される人の数により決定され、各セクターの労働供給量は各セクターの労働者の合計から症状あり感染者数と移動制限された人数を差し引いた値となり以下の式のように表せる。

$$\begin{aligned} l_{1,t} = & N_1 - (I_{1XX} + I_{1XY} + I_{1YY} + I_{1YX}) \\ & - r\{\rho_{XY}(S_{1XY} + A_{1XY} + R_{1XY}) + \sigma_{XY}(S_{1XX} + A_{1XX} + R_{1XX}) \\ & + \rho_{YX}(S_{1YX} + A_{1YX} + R_{1YX}) + \sigma_{YX}(S_{1YY} + A_{1YY} + R_{1YY})\} \end{aligned} \quad (2.51)$$

$$\begin{aligned} l_{2,t} = & N_2 - (I_{2XX} + I_{2XY} + I_{2YY} + I_{2YX}) \\ & - r\{\rho_{XY}(S_{2XY} + A_{2XY} + R_{2XY}) + \sigma_{XY}(S_{2XX} + A_{2XX} + R_{2XX}) \\ & + \rho_{YX}(S_{2YX} + A_{2YX} + R_{2YX}) + \sigma_{YX}(S_{2YY} + A_{2YY} + R_{2YY})\} \end{aligned} \quad (2.52)$$

2.4 パラメータ

マクロ経済モデルに関するパラメータは Bodenstein et al. (2020)[1] を参考に、表 2.2 のように設定した。

表 2.2: マクロ経済モデルに関するパラメータ

	定義
$N_1 = 0.247$	各地域のグループ 1 の割合 (地域 X・地域 Y 同様の割合)
$N_2 = 0.403$	各地域のグループ 2 の割合 (地域 X・地域 Y 同様の割合)
$N_3 = 0.35$	各地域のグループ 3 の割合 (地域 X・地域 Y 同様の割合)
$\theta = \frac{299}{300}$	一ヶ月あたりの割引率
$\delta = \frac{1}{120}$	一ヶ月あたりの資本減却率
$\kappa = 0.6$	習慣形成の強度
$\nu = 0.001$	生産能力の弾力性
$\phi = 0$	資本の可逆性
$\omega = 0.73$	最終財の生産におけるセクター 2 の中間財の影響を示す分配パラメータ
$\eta = 2$	セクター 1 の中間財の生産をコントロールするパラメータ
$\chi = \frac{N_1}{2}$	セクター 1 の最低労働量
$\tau = \frac{3}{2}$	セクター 1 とセクター 2 における代替の弾力性
$\alpha = 0.3$	セクター 2 の中間財の生産における資本の分配パラメータ

各地域の主に疫学モデルに関する初期値は表 2.3 のように設定した.

表 2.3: 各地域の主に疫学モデルに関する初期値

	定義
$S_{1XX} = 0.247 - \frac{2}{60000} (= N_1 - \frac{2}{60000})$	地域 X のセクター 1 の Susceptible
$I_{1XX} = \frac{1}{60000}$	地域 X のセクター 1 の Infective
$A_{1XX} = \frac{1}{60000}$	地域 X のセクター 1 の Asymptomatic
$R_{1XX} = 0$	地域 X のセクター 1 の Removed
$S_{2XX} = 0.403 - \frac{2}{60000} (= N_2 - \frac{2}{60000})$	地域 X のセクター 2 の Susceptible
$I_{2XX} = \frac{1}{60000}$	地域 X のセクター 2 の Infective
$A_{2XX} = \frac{1}{60000}$	地域 X のセクター 2 の Asymptomatic
$R_{2XX} = 0$	地域 X のセクター 2 の Removed
$S_{3XX} = 0.35 - \frac{2}{60000} (= N_3 - \frac{2}{60000})$	地域 X のセクター 3 の Susceptible
$I_{3XX} = \frac{1}{60000}$	地域 X のセクター 3 の Infective
$A_{3XX} = \frac{1}{60000}$	地域 X のセクター 3 の Asymptomatic
$R_{3XX} = 0$	地域 X のセクター 3 の Removed
$S_{1YY} = 0.247 (= N_1)$	地域 Y のセクター 1 の Susceptible
$I_{1YY} = 0$	地域 Y のセクター 1 の Infective
$A_{1YY} = 0$	地域 Y のセクター 1 の Asymptomatic
$R_{1YY} = 0$	地域 Y のセクター 1 の Removed
$S_{2YY} = 0.403 (= N_2)$	地域 Y のセクター 2 の Susceptible
$I_{2YY} = 0$	地域 Y のセクター 2 の Infective
$A_{2YY} = 0$	地域 Y のセクター 2 の Asymptomatic
$R_{2YY} = 0$	地域 Y のセクター 2 の Removed
$S_{3YY} = 0.35 (= N_3)$	地域 Y のセクター 3 の Susceptible
$I_{3YY} = 0$	地域 Y のセクター 3 の Infective
$A_{3YY} = 0$	地域 Y のセクター 3 の Asymptomatic
$R_{3YY} = 0$	地域 Y のセクター 3 の Removed

本研究における地域間の移動についてのパラメータを次のように設定する。平成 27 年に総務省統計局が行った国勢調査によると、他都道府県が従業地・通学地である人口の割合が高い都道府県は、埼玉県 (16.5%)・千葉県 (15.1%)・神奈川県 (14.4%)・奈良県 (15.2%) であり 1 割を超えている。他都道府県が従業地・通学地である人口の割合が低い都道府県は、北海道 (0.2%)・沖縄県 (0.2%) であり、全国平均は 5.1% となっている。本研究では移動に関するパラメータを表 2.4 のように設定した。

表 2.4: 移動に関するパラメータ

	定義
$\rho_{XY} = \rho_{YX} = 1$	出身地域でない地域に移動している人の内、それぞれの出身地域に戻る割合。 (ただし、Infective つまり症状あり感染者は含まれない。) 添え字は左から出身地域・移動している他地域となっている。 例えば、 ρ_{XY} は地域 X 出身者で地域 Y に移動している人の内、地域 X に戻る割合。
$\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.15$ (シナリオ I)	自らの出身地域に滞在している人の内、他地域に移出する割合。 (ただし、Infective つまり症状あり感染者は含まれない。) 添え字は左から出身地域・移動する他地域となっている。 例えば、 σ_{XY} は地域 X 出身者で地域 X に滞在している人の内、地域 Y に移出する割合。
$\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.05$ (シナリオ II)	
$\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.001$ (シナリオ III)	

地域間の移動に関して、移動制限政策がない状況下で他地域へ移動する人は全員出身地域へ帰ることを想定し、 $\rho_{XY} = \rho_{YX} = 1$ と設定している。 σ_{XY}, σ_{YX} は平成 27 年の国勢調査を参考に、移出入率が高い場合 ($\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.15$)、中程度の場合 ($\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.05$)、低い ($\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.001$) 場合を設定している。それぞれシナリオ I, シナリオ II, シナリオ III とする。

3 結果

本研究の目的は、新興感染症の流行状況下において 2 地域間の移動制限が感染者数の抑制に与える影響、及び実質 GDP に与えるダメージを明らかにすることである。ここで、実質 GDP は労働供給量と感染者数によって影響を受けると仮定している。具体的には、以下の移出入率によって異なる 3 つのシナリオについて想定し、それぞれのシナリオにおいて移動制限政策が感染者数や経済ダメージ (実質 GDP へのダメージ) へ与える影響を検証する。

1. シナリオ I :2 地域間の移出入率が高い社会の場合
2. シナリオ II :2 地域間の移出入率が中程度の社会の場合
3. シナリオ III :2 地域間の移出入率が低い社会の場合

比較する項目として、12 ヶ月間の感染者の割合の平均と 12 ヶ月間の実質 GDP の平均を移出入率別 (シナリオ別) に比較する。ここで、12 か月という設定をしたのは後述で紹介する結果のように、移動制限を加えることでパンデミックが収束するのに約 1 年程度かかるという結果が得られたからである。

本研究の仮定では、感染症のパンデミックにおいて人々は Susceptible (感受性保持者つまり未感染者)・Infective (症状あり感染者)・Asymptomatic (無症状感染者)・Removed (回復者) の状態に分かれる。地域 X と地域 Y の 2 地域に分かれ、各人は地域 X もしくは地域 Y を出身地域とし、各労働者は地域 X もしくは地域 Y で労働を行うとする。本研究では各地域の人口・移出入率は対称と仮定し、地域間の移出入率が高いとき労働者の行き来が多く、地域間の移出入率が低いとき労働者の行き来は少ない。2 地域間の移出入率が高い場合をシナリオ I ($\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.15$)、2 地域間の移出入率が中程度の場合をシナリオ II ($\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.05$)、2 地域間の移出入率が低い場合をシナリオ III ($\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.001$) とする。最初の感染者は地域 X で発生し、人の地域間の移動を介して地域 Y へと広がる。本研究は各シナリオにおける、感染者の割合の時系列・移動制限率ごとの 12 か月間の経済ダメージの平均・12 か月間の感染者の割合の平均を算出した。経

済ダメージは、最終財の生産量 y_t の定常状態からの偏差として定義される。経済における定常状態とは、家計や企業などの経済主体は消費や生産といった経済活動を行っているが、それぞれの経済変数が一定に保たれるような経済の状態のことをいう。

3.1 2 地域間の移出入率が高い社会の場合 (シナリオ I)

2 地域間の移出入率が高い (労働者の地域間の行き来が多い) 社会における移動制限政策の効果を調べるため、 $\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.15$ と設定した時の、移動制限率ごとの感染者数の時系列と移動制限率ごとの感染者数及び経済ダメージの 12 か月間の平均への影響を検証した。

図 3.1 では、感染者数のピークにおける感染者の割合や感染者数のピークの時期を移動制限率ごとに検証した。図 3.2 では感染症が収束 (いずれのシナリオにおいても 12 か月で収束するという結果が得られている) するまでの感染者や経済ダメージは、移動制限率によってどのように変動するか検証した。

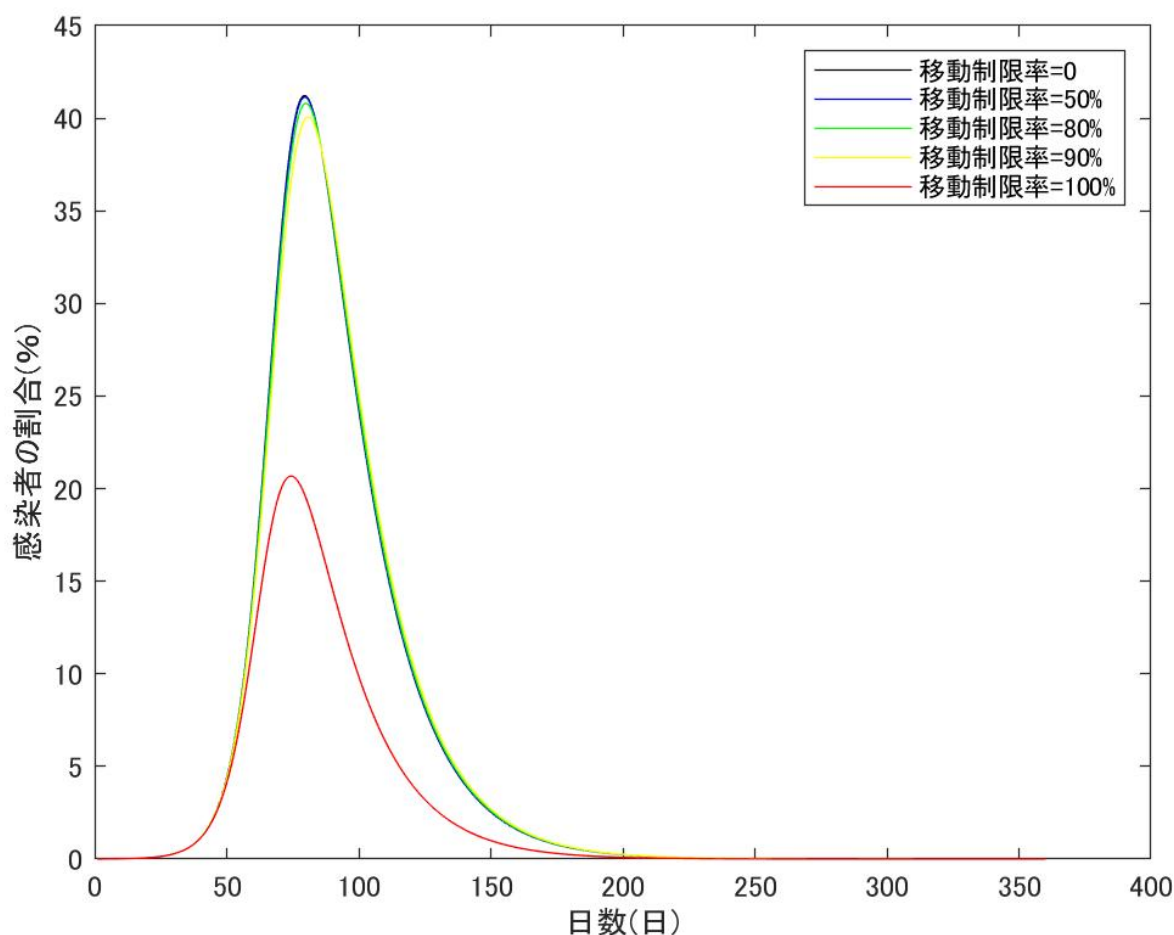


図 3.1: 地域間の移出入率が高い場合の感染者の割合の推移

移出入率のパラメータを $\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.15$ と設定した場合、症状ありの感染者と無症状感染者の合計感染者数の割合の時系列は図 3.1 のようになる。移動制限率を 90% まで大きくしても感染者の割合はほとんど低くならないが、100% (赤色) の場合にピーク時の感染者の割合が低くなっていることがわかる。また、いずれの移動制限率においてもピークの時期に変化はないことがわかった。

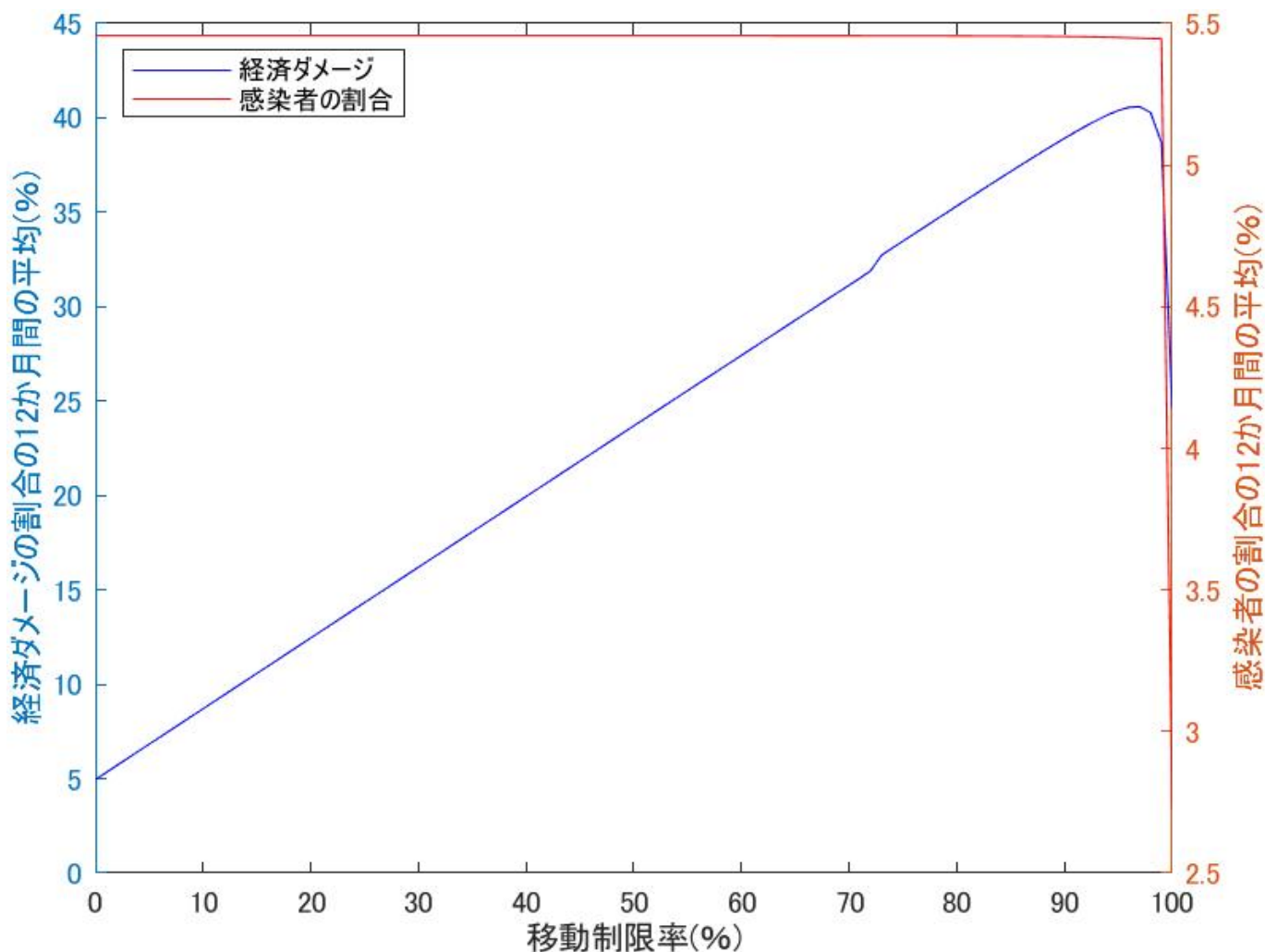


図 3.2: 地域間の移出入率が高い場合の経済ダメージ・感染者

移動制限率の影響をより細かく見るために、経済ダメージ及び感染者数の12か月間の平均を移動制限率1%ごとに描画させた図が図3.2である。感染者の割合の12か月間の平均は、移動制限率100%の場合に約2.5%に低下するが、それ以外の場合には約5.4%にて感染者の割合はほとんど変化しない。経済ダメージの12か月間の平均は、移動制限率が高くなるほど大きくなり、移動制限率が約97%の時にピーク(約40%)になるが、100%の時にはある程度緩和される(約25%)。

以上の結果からシナリオIについて、次のことがいえる。感染者数について、移動制限率100%(都市封鎖)の場合に最小となり、それ以外つまり都市封鎖による移動制限の場合以外は感染者数にほとんど変動はない。経済ダメージについては、移動制限率を高めるほど大きくなる。これは労働者の移動が制限されることによる影響であると思われる。ただし、移動制限率を100%にすることで経済へのダメージはある程度緩和される。これは感染者の増加を都市封鎖によって防ぎ、労働供給量の減少を抑制した影響であると思われる。

これらの結果は、感染者数の抑制のためには移動制限率100%が最適であるが、感染者数の低下よりも労働者が通勤のための移動ができないことの影響が大きく、経済にとっては移動制限率100%が最適でないことを意味する。また、移動制限率は100%近くまではほとんど感染者数の平均に変動はなく、経済ダメージは移動制限率0%の時に最小化されることから経済の維持を優先するならば移動制限率0%が最適であることを示している*4。

*4 第4章で議論されるように本研究では病院の患者の受け入れ上限や重症者及び死亡者を考慮しないモデルとなっていることに注意する必要がある。

3.2 2 地域間の移出入率が中程度の社会の場合 (シナリオ II)

2 地域間の移出入率が中程度 (労働者の地域間の行き来が全国平均的) の社会における移動制限政策の効果を調べるため、 $\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.05$ と設定した時の、移動制限率ごとの感染者数の時系列と移動制限率ごとの感染者数及び経済ダメージの 12 か月間の平均への影響を検証した。

図 3.3 では、感染者数のピークにおける感染者の割合や感染者数のピークの時期を移動制限率ごとに検証した。図 3.4 では感染症が収束 (いずれのシナリオにおいても 12 か月で収束するという結果が得られている) するまでの感染者や経済ダメージは、移動制限率によってどのように変動するか検証した。

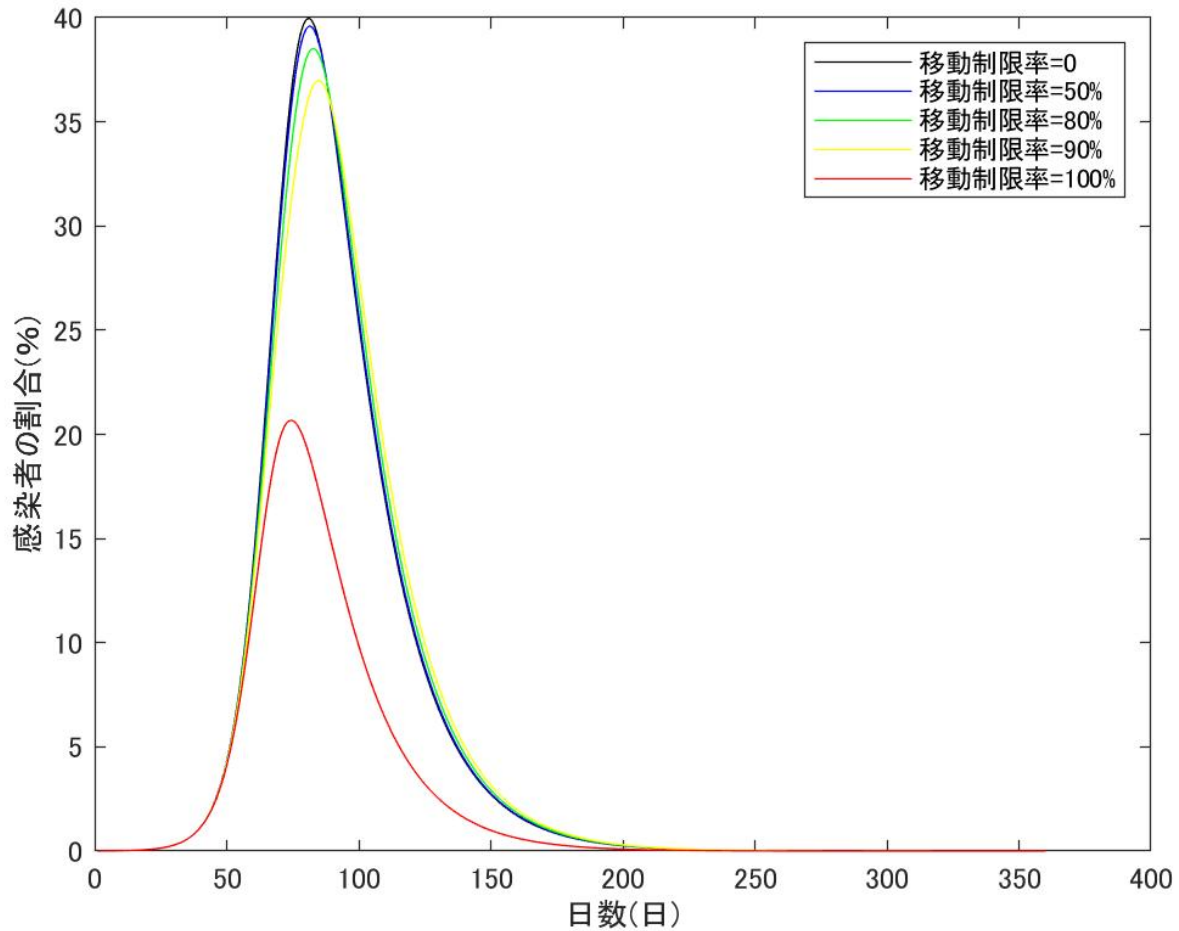


図 3.3: 地域間の移出入率が中程度の場合の感染者数の割合の推移

移出入率のパラメータを $\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.05$ と設定した場合、症状ありの感染者と無症状感染者の合計感染者数の割合の時系列は図 3.3 のようになる。シナリオ I と同様、移動制限率を 90% まで大きくしても感染者の割合はほとんど低くならないが、100% (赤色) の場合にピーク時の感染者の割合が低くなっていることがわかる。また、いずれの移動制限率においてもピークの時期に変化はないことがわかった。

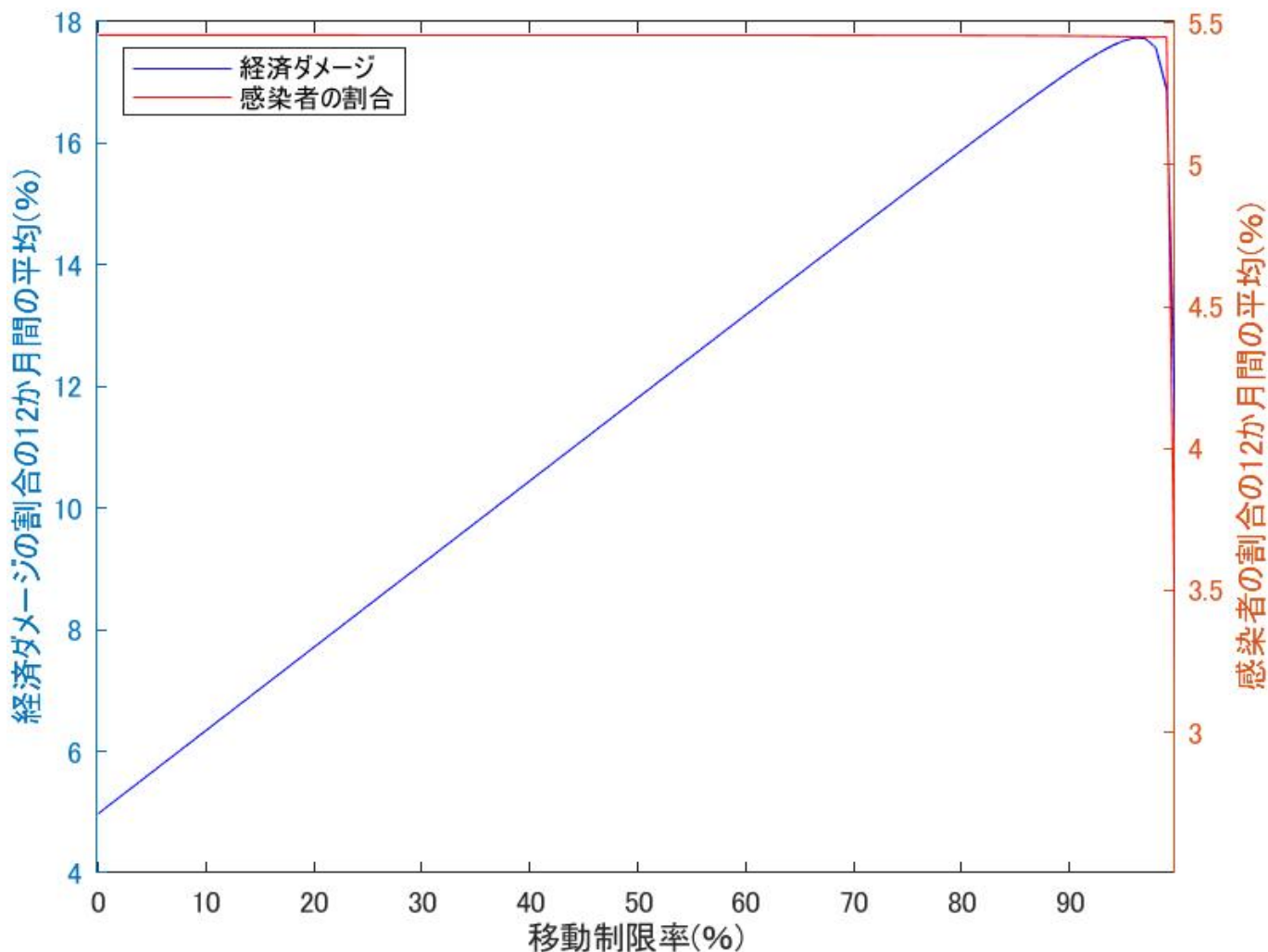


図 3.4: 地域間の移出入率が中程度の場合の経済ダメージ・感染者

移動制限率の影響をより細かく見るために、経済ダメージ及び感染者数の12か月間の平均を移動制限率1%ごとに描画させた図が図3.4である。感染者の割合の12か月間の平均はシナリオI同様、移動制限率100%の場合に約2.5%に低下するが、それ以外の場合は約5.4%にて感染者の割合はほとんど変化しない。経済ダメージの12か月間の平均は、移動制限率が高くなるほど大きくなり、移動制限率が約97%の時にピーク(約18%)になるが、100%の時にはある程度緩和される(約12%)。

以上の結果からシナリオIIについて、次のことがいえる。感染者数について、移動制限率100%(都市封鎖)の場合に最小となり、それ以外つまり都市封鎖による移動制限の場合以外は感染者数にほとんど変動はない。これはシナリオIとほとんど同じ傾向である。経済ダメージについては、移動制限率を高めるほど大きくなる。これは労働者の移動が制限されることによる影響であると思われる。ただし、移動制限率を100%にすることで経済へのダメージはある程度緩和される。これは感染者の増加を都市封鎖によって防ぎ、労働供給量の減少を抑制した影響であると思われる。経済ダメージについてもシナリオIとほとんど同じ傾向が見られるが、移動制限率を高めたときの経済へのダメージはシナリオIの方が大きく上昇している。

これらの結果は、シナリオIとシナリオIIがほとんど同じ傾向にあることを示している。シナリオIIにおいても、感染者数の抑制のためには移動制限率100%が最適であるが、感染者数の低下よりも労働者が通勤のための移動ができないことの影響が大きく、経済にとっては移動制限率100%が最適でないことを意味する。また、移動制限率は100%近くまではほとんど感染者数の平均に変動はなく、経済ダメージは移動制限率0%の時に最小化されることから経済の維持を優先するならば移動制限率0%が最適であることを示している*5。

*5 シナリオI同様、第4章で議論されるように本研究では病院の患者の受け入れ上限や重症者及び死亡者を考慮しないモデルとなっていることに注意する必要がある。

3.3 2 地域間の移出入率が低い社会の場合 (シナリオ III)

2 地域間の移出入率が低い (労働者の地域間の行き来が少ない) 社会における移動制限政策の効果調べるため、 $\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.001$ と設定した時の、移動制限率ごとの感染者数の時系列と移動制限率ごとの感染者数及び経済ダメージの 12 か月間の平均への影響を検証した。

図 3.5 では、感染者数のピークにおける感染者の割合や感染者数のピークの時期を移動制限率ごとに検証した。図 3.6 では感染症が収束 (いずれのシナリオにおいても 12 か月で収束するという結果が得られている) するまでの感染者や経済ダメージは、移動制限率によってどのように変動するか検証した。

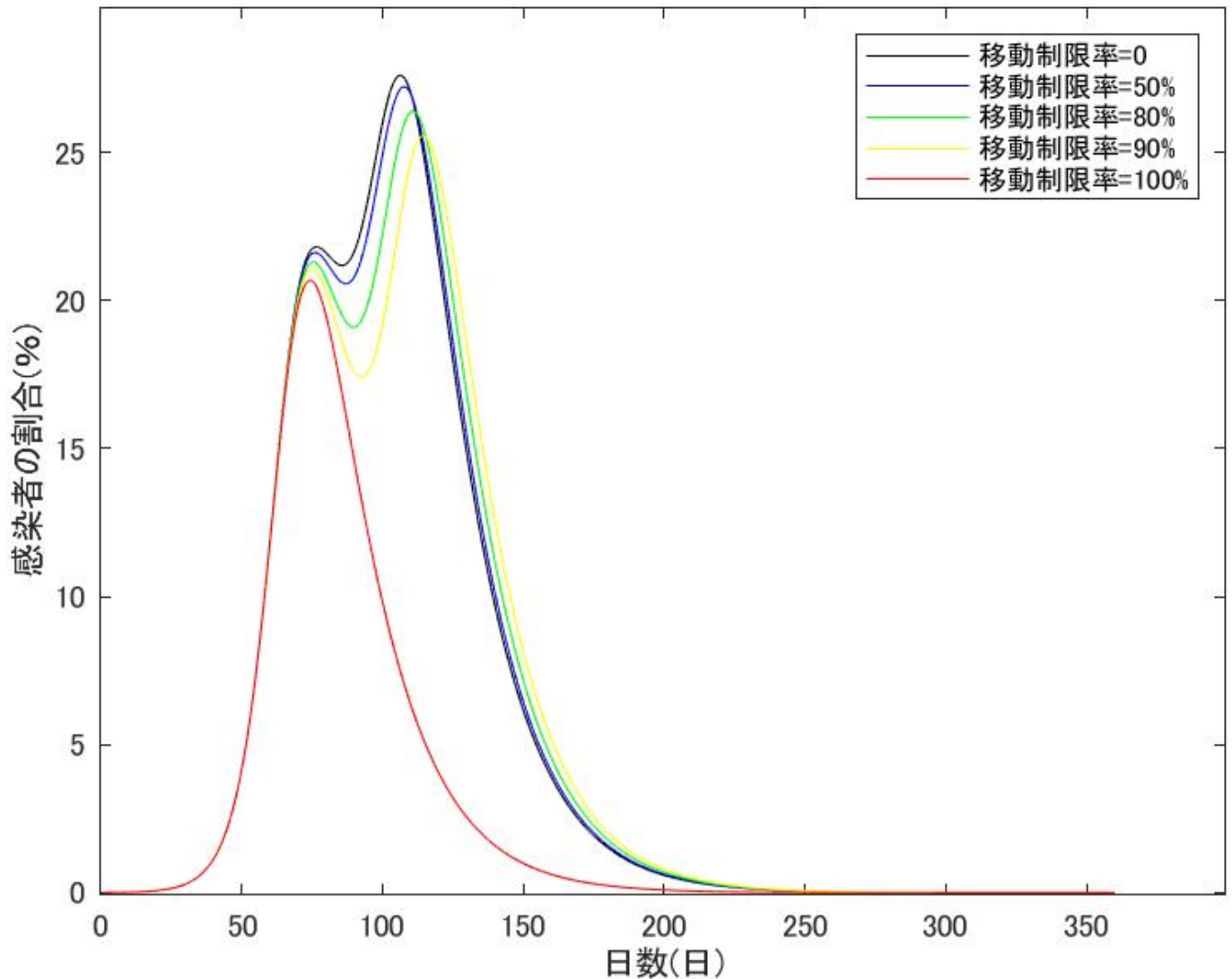


図 3.5: 地域間の移出入率が低い場合における感染者数の割合の推移

移出入率のパラメータを $\sigma_{XY} = \sigma_{YX} = 0.001$ と設定した場合、症状ありの感染者数と無症状感染者の合計感染者数の割合の時系列は図 3.5 のようになる。シナリオ I やシナリオ II と同様、移動制限率を高くしても感染者の割合はほとんど低くならないが、100% (赤色) の場合にピーク時における感染者の割合が低下していることがわかった。

シナリオ I やシナリオ II と異なり、シナリオ III では移動制限率 100% の場合と他の移動制限率の場合とで感染者数のピークの時期がずれることが示されている。この主な原因は、シナリオ III (2 地域間の移出入率が低い社会) では、地域 X でのピークの時期と地域 Y でのピークの時期にずれが生じていることである。移出入率が低いことで、感染者の地域 Y への流入はシナリオ I やシナリオ II よりも遅くなることにより、各地域のピークの時期にずれが生じる。地域 X での感染が収束しないうちに地域 Y で感染症が流行し、2 地域全体のピークの時期は他のシナリオと比べ遅くなっている。しかし、シ

ナリオ III で移動制限率を 100% に設定すると地域 Y への感染者の流入もなくなり，地域 X の感染者数のピークが 2 地域全体の感染者数のピークとなり，他の移動制限率とピークの時期にずれが生じる原因となると推察される。

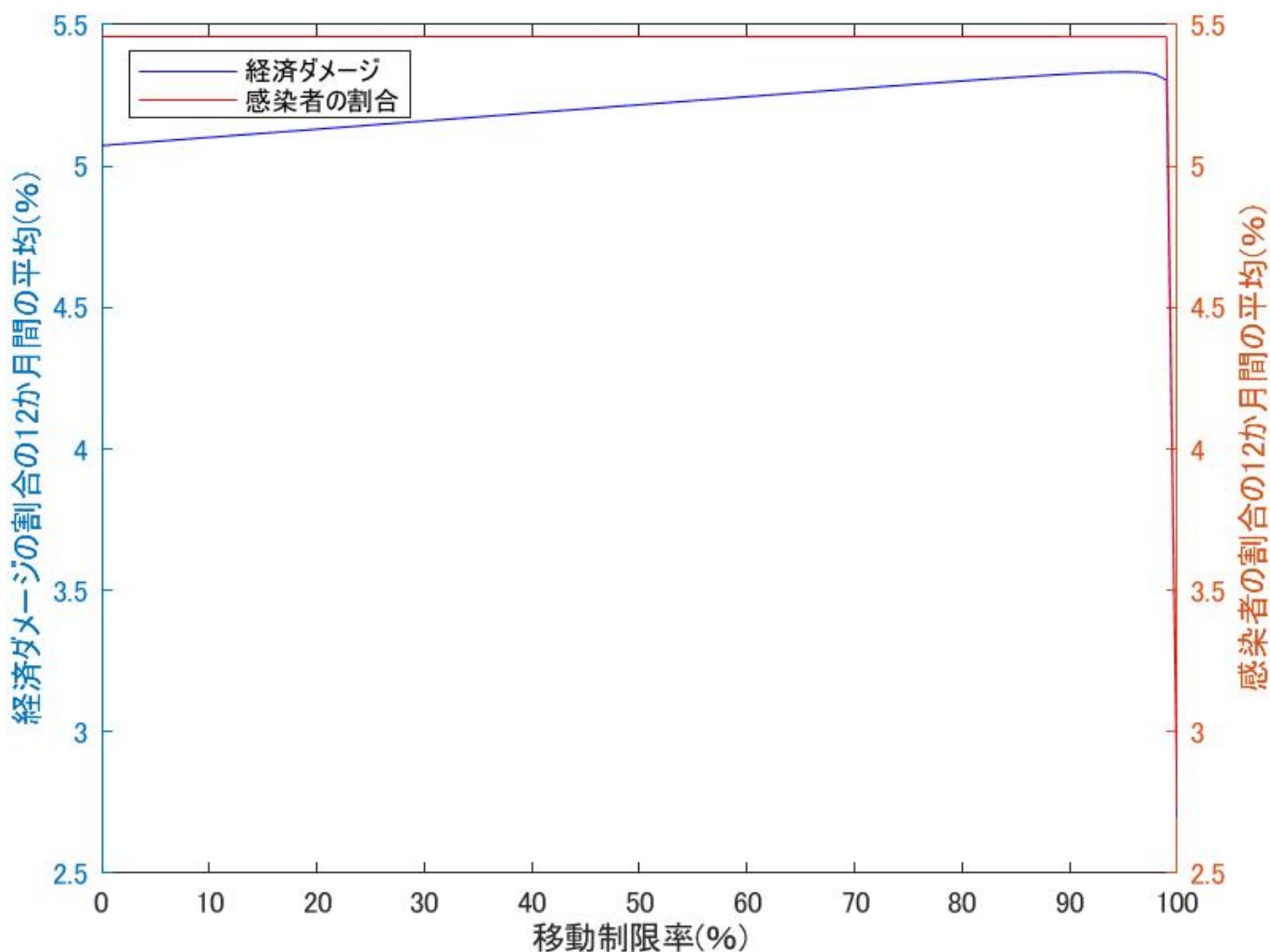


図 3.6: 地域間の移出入率が低い場合における経済ダメージ・感染者

移動制限率の影響をより細かく見るために，経済ダメージ及び感染者数の 12 か月間の平均を移動制限率 1% ごとに描画させた図が図 3.6 である．感染者の割合の 12 か月間の平均はシナリオ I やシナリオ II 同様，移動制限率 100% の場合に約 2.5% に低下するが，それ以外の場合は約 5.4% にて感染者の割合はほとんど変化しない．経済ダメージの 12 か月間の平均は，少しずつではあるものの移動制限率が大きくなればなるほど大きくなり，移動制限率が約 97% の時にピーク（約 5.3%）となることがわかる．また，シナリオ I やシナリオ II と異なり，移動制限率が 100% 近くつまり都市封鎖のような状況にて経済ダメージが最小となることがわかる．

以上の結果からシナリオ III について，次のことがいえる．感染者数について，移動制限率 100%（都市封鎖）の場合に最小となり，それ以外つまり都市封鎖できない移動制限の場合は感染者数にほとんど影響を与えない．これはシナリオ I やシナリオ II とほとんど同じ傾向である．経済ダメージについては，シナリオ I やシナリオ II と異なり，移動制限率を高めても経済ダメージは大きく変動せず（緩やかに大きくなる），100% の時に経済ダメージが大きく低下し最小化されることがわかった．

これらの結果は，シナリオ I やシナリオ II と異なり，移動制限によって労働者が通勤のための移動をできないことの影響は感染者の増加より影響が少なく，移動制限率を 100% 設定する（都市封鎖を行う）ことが感染者数の抑制及び経済ダメージの抑制に最適であることを意味している．

4 議論

4.1 本研究の結果と議論

新型コロナウイルスのような新興感染症のパンデミックにおいて、Bodenstein et al. (2020) [1] は非薬学的介入のうち、1地域の中で人々の接触を制限することによる感染者数及び経済への影響を検証した。本研究ではBodenstein et al. (2020) [1] のモデルでは考慮することができなかった、複数地域間の移動制限に注目し、2地域間の移動制限による経済ダメージについて次の2点が示された。

まず1点目は、地域間の移出入率が低い場合、移動制限率を高めても経済へのダメージはほとんど変化せず、移動制限率100%付近にて経済ダメージが大きく低下することである。移動制限率100%にして感染者の行き来を徹底的に抑えることで経済へのダメージは最小化される。移動制限率を高めても経済ダメージの大きな増加につながらない原因は、移出入率が低いことにより移動制限率の増加が労働供給量の減少につながらないためであると考えられる。このような地域間で労働者の行き来が少ない社会においては、移動制限率を100%にしても労働供給量へのダメージは少なく、移動制限率を100%にして感染者の行き来を徹底的に抑えることが政策として重要となる可能性がある。

感染者数に関して、シナリオⅢにおいて、移動制限率をほぼ100%に設定することができれば感染者数の平均は約5.5%から約2.5%まで低下する。しかし、移動制限率を100%にすることができない、つまり数%の移出入率を許してしまうことで感染者数の平均が約5.5%まで増加する恐れがあるので、感染者を最大限に抑制する場合には移動制限率を100%に保つ必要があると考えられる。

次に2点目は、地域間の移出入率が中程度以上の場合(シナリオⅠやシナリオⅡ)、移動制限率を高めるほど経済へのダメージは大きくなること、移動制限率0%の時に経済ダメージは最小化されることである。出身地域でない他地域で働く人が多い場合、このような結果になることは自然であると考えられる。ただし、本研究のモデルはBodenstein et al. (2020) [1] と同様に病院の患者の受け入れ上限や重症者及び死者数を考慮しないモデルになっていることに注意する必要がある。なぜならば、実際は移動制限率が0%である時、病院の患者の受け入れ上限を超えてしまうことによる医療崩壊の恐れや、労働に支障をきたす後遺症を患った重症者及び死亡者(死亡者は永久に労働不可能)の増加による経済ダメージの影響を考慮しなければならないからである。これは後述にもあるように本研究のモデルの限界となっている。

感染者数に関して、シナリオⅢ同様、移動制限率をほぼ100%に設定することができれば感染者数の平均は約5.5%から約2.5%まで低下する。しかし、移動制限率を100%にすることができない、つまり数%の移出入率を許してしまうことで感染者数の平均が約5.5%まで増加する恐れがあるので、感染者を最大限に抑制する場合には移動制限率を100%に保つ必要があると考えられる。

本研究で感染拡大予防策として取り上げた2地域間の移動制限政策において、感染者の割合を抑えるためにはいずれの移出入率の社会においても、移動制限率を100%に設定するのが望ましいという結果を得た。地域間の移出入を一切許さないことが感染者数を抑える上で重要となり、移動制限のみでは移動制限率90%を達成しても感染拡大防止策としての効果はほとんどないということが示された。しかし、地域間の移出入率が高い社会や中程度の社会の経済ダメージを考慮すると、移動制限率を100%設定することは必ずしも最適な移動制限率とはいえない。移出入率が中程度以上の社会では、ある程度の移動を許しつつも、マスクの着用を推奨することや接触機会を少なくすることといった移動制限以外の非薬学的介入が必要であることが示唆される。

以上のようなシナリオⅠやシナリオⅡでは移動制限率0%で経済ダメージが最小化され、シナリオⅢでは移動制限率100%で経済ダメージが最小化されるという結果は、SIRモデルに複数地域の移動を組み込んだSattenspiel and Dietz (1995) [4] のモデルとBodenstein et al. (2020) [1] の経済モデルを組み合わせた本研究によって初めて分かったことである。

4.2 今後の課題

本モデルの問題点は病院の患者の受け入れ可能者の上限やGiordano et al. (2020)[11]のようにモデルに死亡者や重症者が設定されていないことである。本研究では、移出入率が高い場合そして中程度の場合から得られた結果のように、移動制限率は低いほど経済ダメージが小さくなり、移動制限率が0%の時に最も小さくなると示された。しかし、感染者数が多

いほど患者受け入れが不可能な病院や死亡者・重症者が多くなり、経済へのダメージもそれに伴い大きくなるはずである。なぜなら、労働者が死亡するとその労働者は永久に労働が不可能となる（重症者においても後遺症などで労働に支障をきたす）ことから、感染者の割合の平均が比較的高い移動制限率では、今回得られた結果よりも経済へのダメージは大きくなると予想される。従って、移出入率が高い場合と中程度の場合において、経済へのダメージが最も小さくなる移動制限率は0%ではないことが予想される。

また、本研究の課題として挙げられるのは、供給ショックの仮定の妥当性である。経済ショックには需要ショックと供給ショックの2種類あり、本研究は労働供給量の制限で労働者が経済活動を行えないことによる供給ショックを仮定した。本研究における消費は、供給ショックによって賃金の減った家計の予算制約の下で、家計の効用を最大化させるように決定される。つまり、供給ショックから起点となる仮定を置き、需要ショックが発生している。しかし、需要ショックが起点となる可能性も無視するべきではない。例えば、消費者が自ら感染予防のためなどの要因から消費行動を減らし、経済にダメージを与える場合などが当てはまる。

本研究のモデルの拡張として考えられるのは、地域数の拡張と各地域の移出入率・人口の異質性である。本研究では2地域間の移動制限政策の効果の検証を行った。しかし、実際には1つの国の中には多くの地域が存在しそれぞれの地域間で人の移出入があるため、より多くの地域を想定し検証する必要がある。さらには本研究では各地域同じ人口・移出入率を想定した検証を行ったが、実際は各地域同じ人口・移出入率であることは想定しにくい。Chang et al. (2020) [12] は、一様に移出入率を下げるよりも一部のスーパースプレッダー POI (points of interests) への移動を制限することが効果的であることを示している。この POI とは、非住宅地のうち人々の訪れる場所 (例えばレストラン・食料品店・宗教施設) のことであり、スーパースプレッダー POI つまり感染力が高い POI への移動を減らすことが効果的であることが示されている。本研究においても、より多くの地域や異なる人口・移出入率を想定し、感染力の高い地域や移動制限を行うと経済ダメージが大きくなるような地域を検証する必要がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20K04979, 19H02376A の助成を受けたものです.

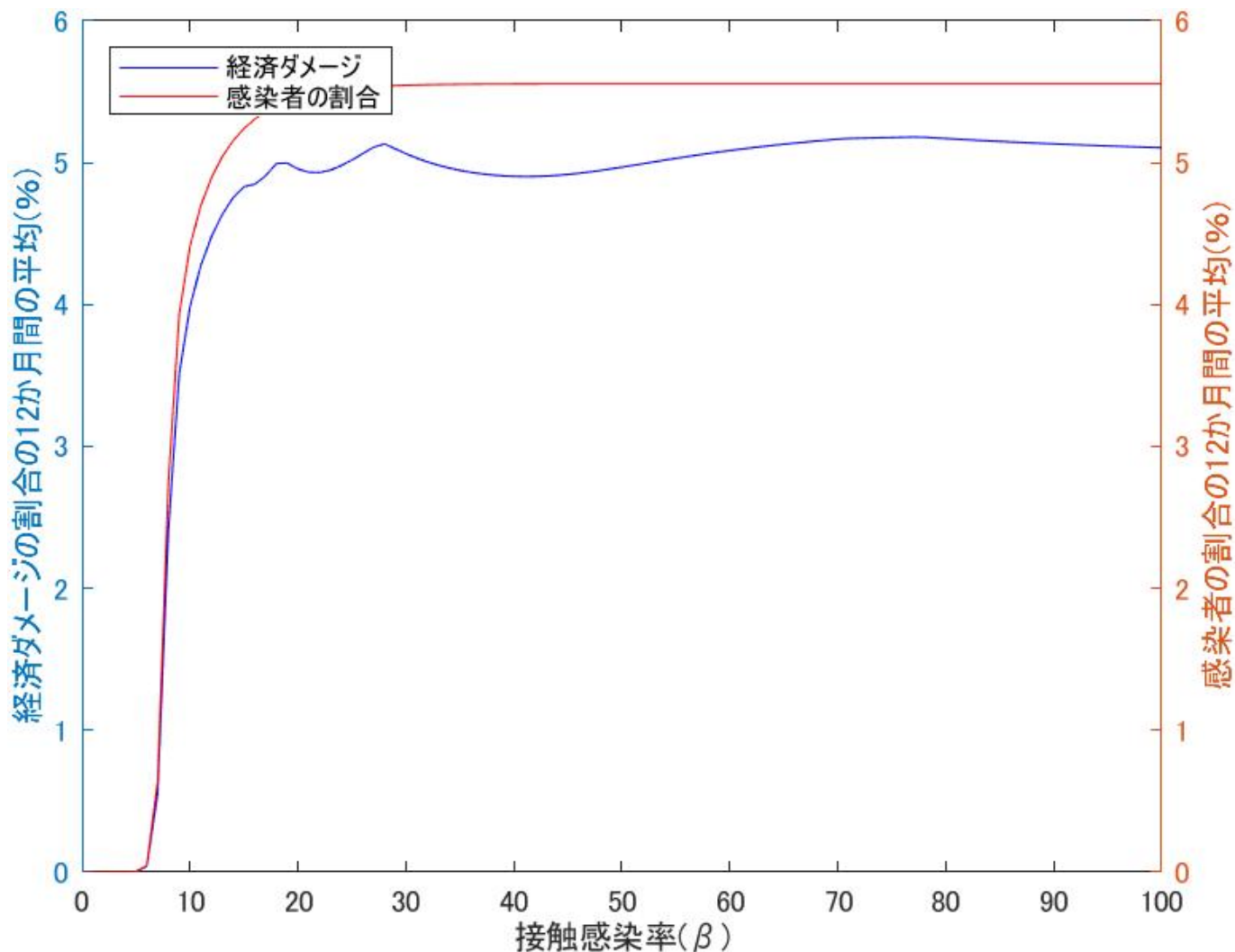
参考文献

- [1] Bodenstein, Martin, Giancarlo Corsetti, and Luca Guerrieri. “Social distancing and supply disruptions in a pandemic.” (2020).
- [2] Kermack, William Ogilvy, and Anderson G. McKendrick. “A contribution to the mathematical theory of epidemics.” *Proceedings of the royal society of london. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character* 115.772 (1927): 700-721.
- [3] 久保田 荘. “「コロナ危機は需要ショックなのか供給ショックなのか？」.” 早稲田大学ソーシャル&ヒューマン・キャピタル研究所, 2020年4月8日更新 (最終閲覧日 2021年1月19日).
<https://www.waseda.jp/prj-wishproject/covid-19.html>
- [4] Sattenspiel, Lisa, and Klaus Dietz. “A structured epidemic model incorporating geographic mobility among regions.” *Mathematical biosciences* 128.1 (1995): 71-92.
- [5] Sattenspiel, Lisa, and D. Ann Herring. “Simulating the effect of quarantine on the spread of the 1918–19 flu in central Canada.” *Bulletin of mathematical biology* 65.1 (2003): 1-26.
- [6] Cosner, Chris, et al. “The effects of human movement on the persistence of vector-borne diseases.” *Journal of theoretical biology* 258.4 (2009): 550-560.
- [7] Guerrieri, Luca, and Matteo Iacoviello. “OccBin: A toolkit for solving dynamic models with occasionally binding constraints easily.” *Journal of Monetary Economics* 70 (2015): 22-38.
- [8] Lavezzo, Enrico, et al. “Suppression of COVID-19 outbreak in the municipality of Vo, Italy.” *medRxiv* (2020).
- [9] Ianni, Aldo, and Nicola Rossi. “Describing the COVID-19 outbreak during the lockdown: fitting modified SIR models to data.” *The European Physical Journal Plus* 135.11 (2020): 1-10.
- [10] 総務省統計局. “平成 27 年国勢調査結果.” (2017). (最終閲覧日 2021 年 1 月 19 日).
<https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2015/kekka.html>
- [11] Giordano, Giulia, et al. “Modelling the COVID-19 epidemic and implementation of population-wide interventions in Italy.” *Nature Medicine* (2020): 1-6.
- [12] Chang, Serina, et al. “Mobility network models of COVID-19 explain inequities and inform reopening.” *Nature* (2020): 1-6.
- [13] Atkeson, Andrew. “What Will Be the Economic Impact of COVID-19 in the US? Rough Estimates of Disease Scenarios.” No. w26867. National Bureau of Economic Research, 2020.
- [14] 小林慶一郎, 奴田原健悟. “感染症拡大モデルにおける行動制限政策と検査隔離政策の比較.” CIGS Working Paper Series No. 20-005J (2020).

付録 A 感度分析

本研究における接触感染率のパラメータ β は新型コロナウイルスの流行初期のデータをもとに設定されたパラメータであり、Bodenstein et al. (2020) [1] や Atkeson (2020) [13] で議論されているように、不確実性のあるパラメータであると考えられる。各シナリオにて、接触感染率が変動した時の、感染者数・経済ダメージの感度を検証した。なお、いずれの場合も移動制限はない (移動制限率は 0%) ものとする。

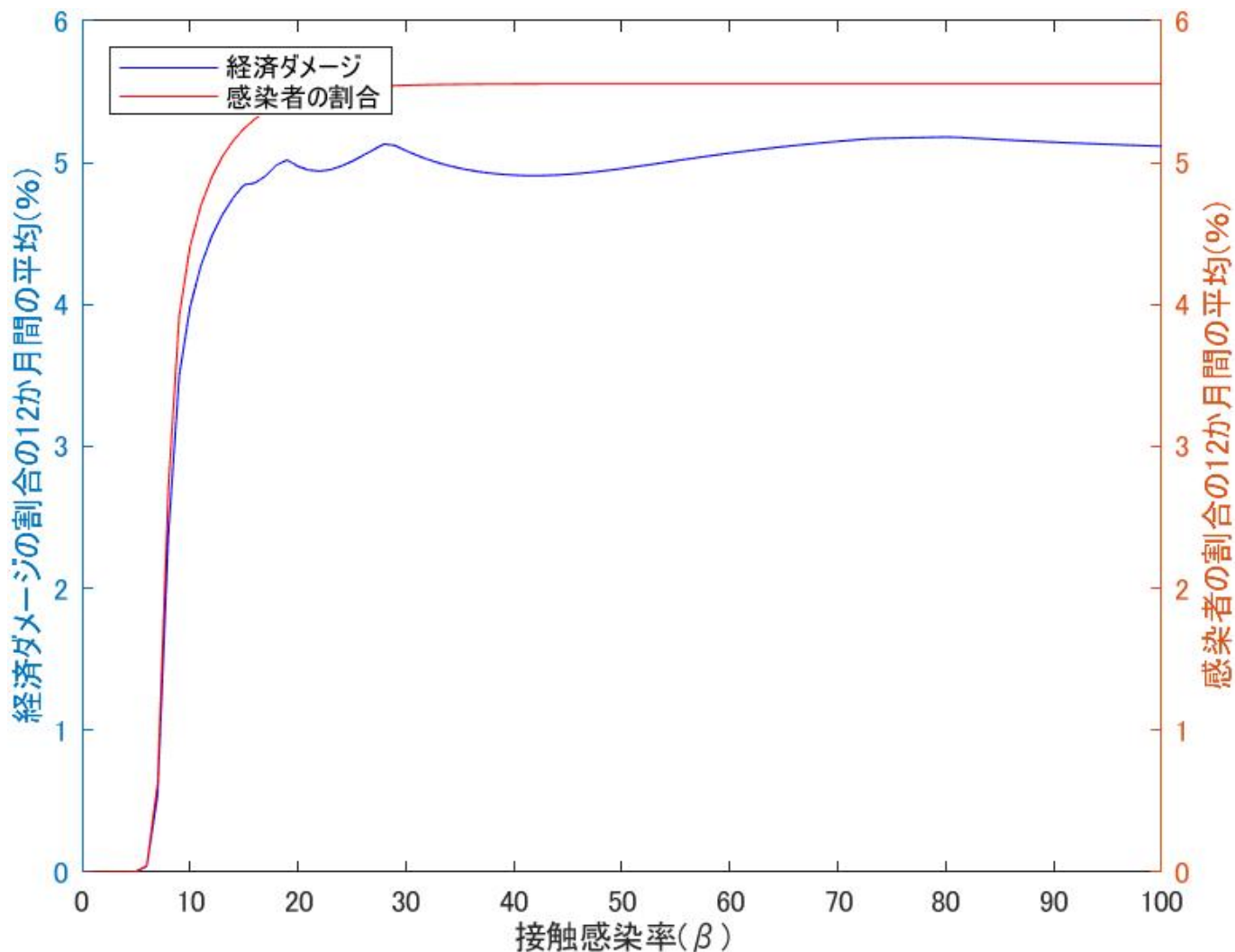
A.1 2 地域間の移出入率が高い社会の場合 (シナリオ I)



図付録 A.1: シナリオ I における接触感染率 β に対する感度分析

接触感染率 0% から約 5% までは感染者数・経済ダメージは約 0% で変動しない。接触感染率が約 5% から約 20% にかけての変動は大きく、経済ダメージは約 5% まで上昇し感染者の割合は約 5.5% まで上昇する。

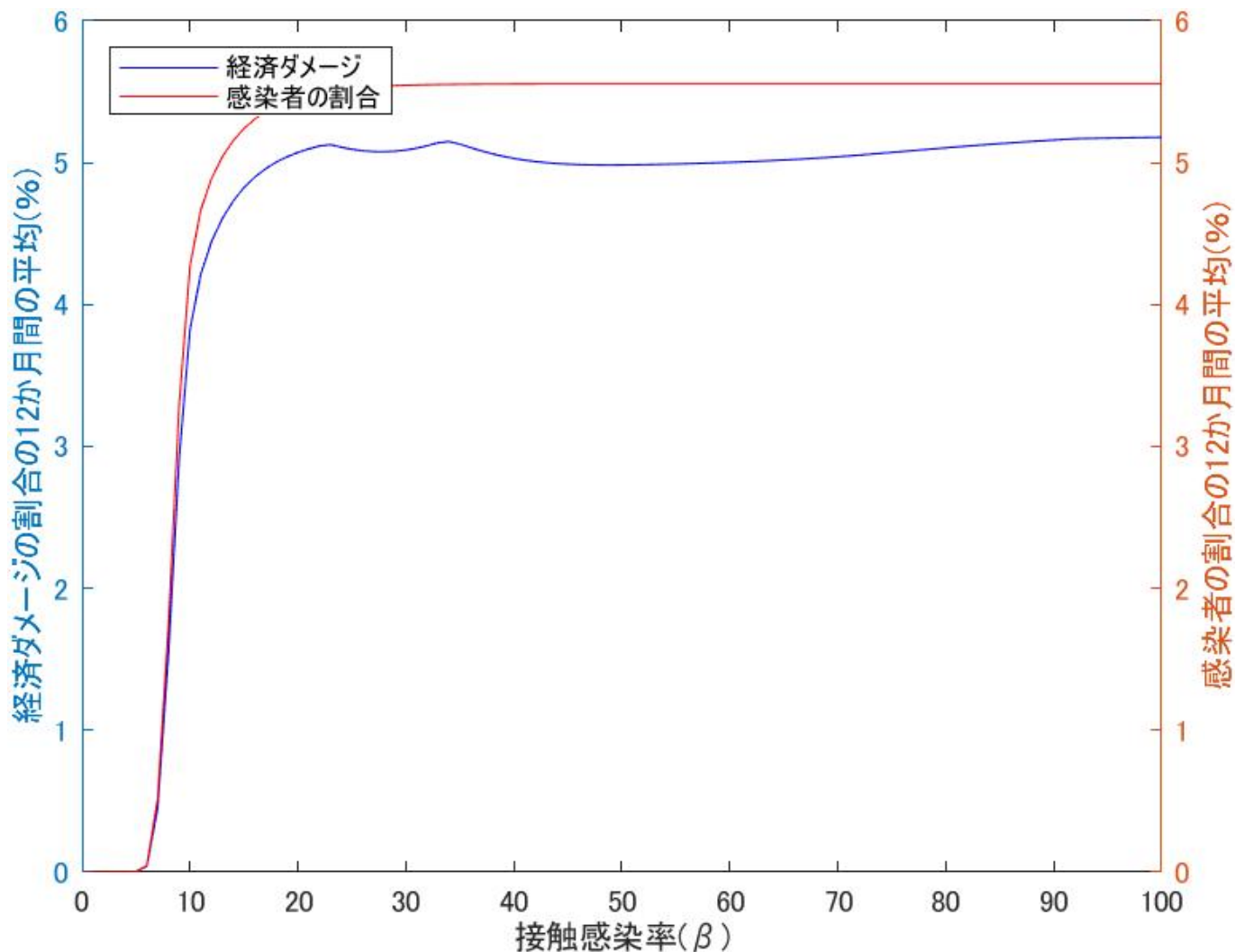
A.2 2地域間の移出入率が中程度の社会の場合 (シナリオ II)



図付録 A.2: シナリオ II における接触感染率 β に対する感度分析

シナリオ I とほぼ同様の変動をしている。接触感染率 0% から約 5% までは感染者数・経済ダメージは約 0% で変動しない。接触感染率が約 5% から約 20% にかけての変動は大きく、経済ダメージは約 5% まで上昇し感染者の割合は約 5.5% まで上昇する。

A.3 2地域間の移出入率が低い社会の場合 (シナリオ III)



図付録 A.3: シナリオ III における接触感染率 β に対する感度分析

シナリオ I やシナリオ II とほぼ同様の変動をしている。接触感染率 0% から約 5% までは感染者数・経済ダメージは約 0% で変動しない。接触感染率が約 5% から約 20% にかけての変動は大きく、経済ダメージは約 5% まで上昇し感染者の割合は約 5.5% まで上昇する。

A.4 感度分析のまとめ

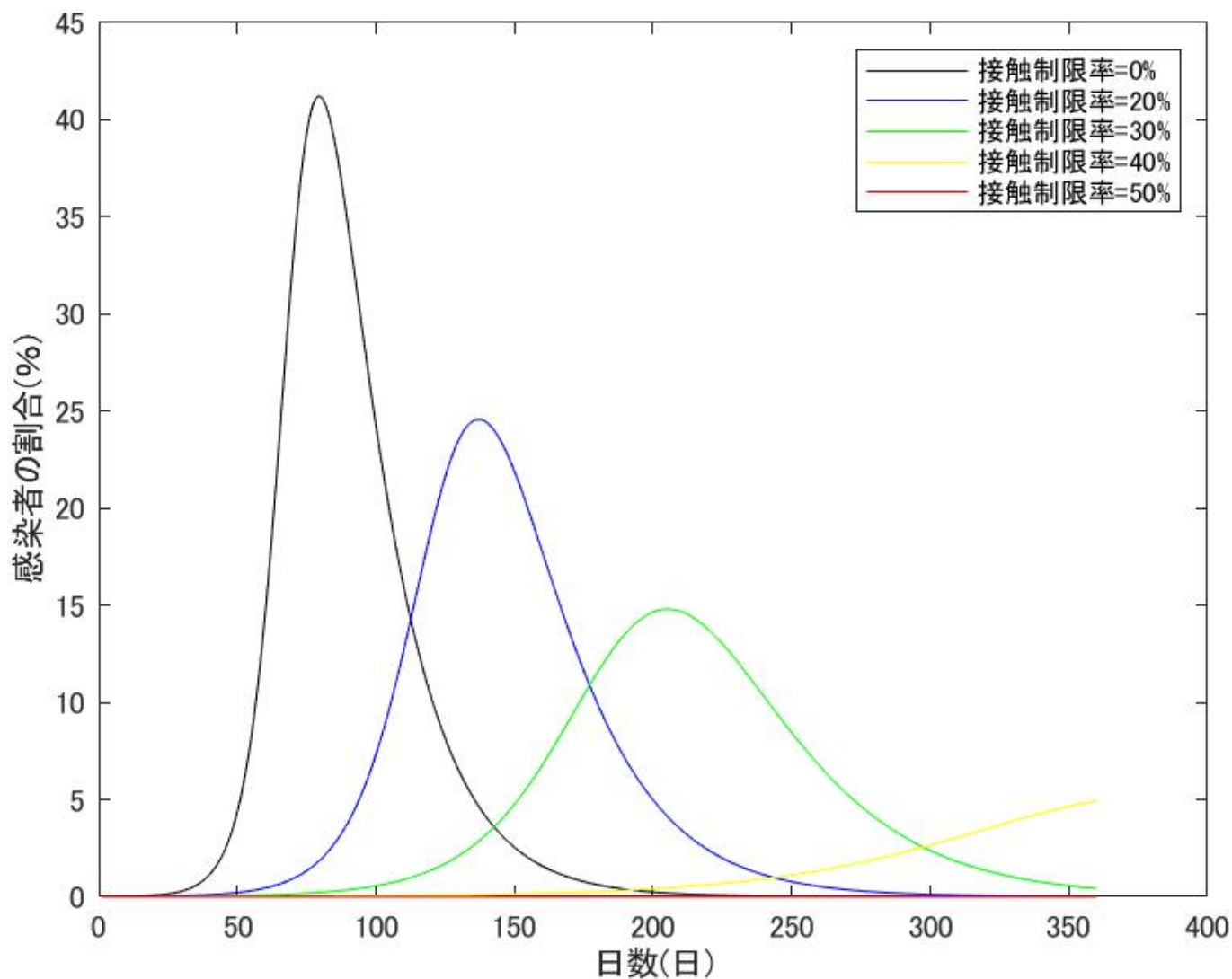
感度分析の結果として、いずれのシナリオの場合も接触感染率が 20% までは感染者数・経済ダメージは大きくなり、20% より大きくなると感染者・経済ダメージの変動はなくなる。つまり、移出入率の変動に対する感染者数・経済ダメージの変動はほとんどないが、接触感染率の変動 (約 5% から約 20% にかけての変動) に対する感染者数・経済ダメージの変動は大きいため、本研究の結果は接触感染率によって大きく変わりうる可能性があるといえる。

付録 B 接触機会の制限による感染者数及び経済ダメージへの影響

本研究の結果としていずれのシナリオにおいても移動制限率が約 100% にならない限り、感染者数の割合は大きく変化しないという結果が得られた。しかし、シナリオ I やシナリオ II のような移出入率が中程度以上の場合、移動制限率を大きくするほど経済ダメージは大きくなる傾向にあり、経済にとって移動制限率 100% は最適とは言えない。そのため、シナリオ I やシナリオ II においては移動制限政策以外の非薬学的介入政策を行う必要があることが示唆される。ここでは各人の接触機会が制限された時の感染者数・経済ダメージへの影響を検証した。なお、いずれの場合も移動制限はなく（移動制限率は 0%）、接触を制限されても労働は可能であるつまり労働供給量へのダメージは症状ありの感染者数によって決まるものとする。

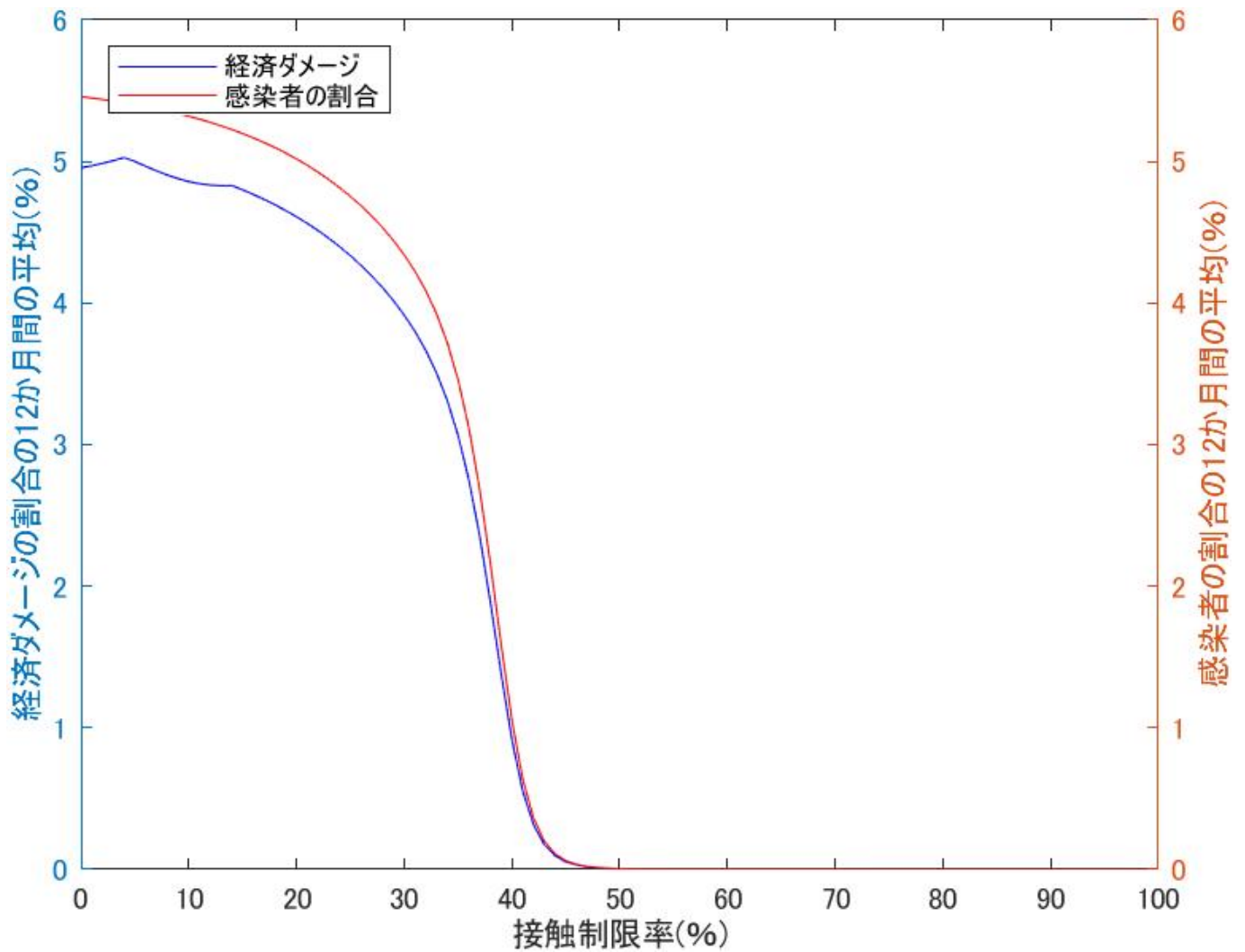
ここにおける接触機会の制限とは Bodenstein et al. (2020) [1] と小林・奴田原 (2020) [14] を参考に、各状態 (Susceptible・Infective・Asymptomatic・Removed) 一律に接触が r の割合で減るものとする。この時、感受性保持者 (Susceptible) と感染者 (Infective・Asymptomatic) の接触がそれぞれ $1 - r$ に制限されるので、接触機会が制限がない場合に比べて $(1 - r)^2$ になる。例えば、接触制限率が 20% の場合、感受性保持者 (Susceptible) と感染者 (Infective・Asymptomatic) の接触がそれぞれ 80% に制限され、接触機会は制限がないときに比べて $0.8^2 = 0.64$ つまり 64% になる。モデル上では接触感染率 (接触した時の感染率) のパラメータ β に $(1 - r)^2$ を乗算することで表現される。

B.1 2地域間の移出入率が高い社会の場合 (シナリオ I)



図付録 B.1: シナリオ I における接触制限による感染者の割合の推移

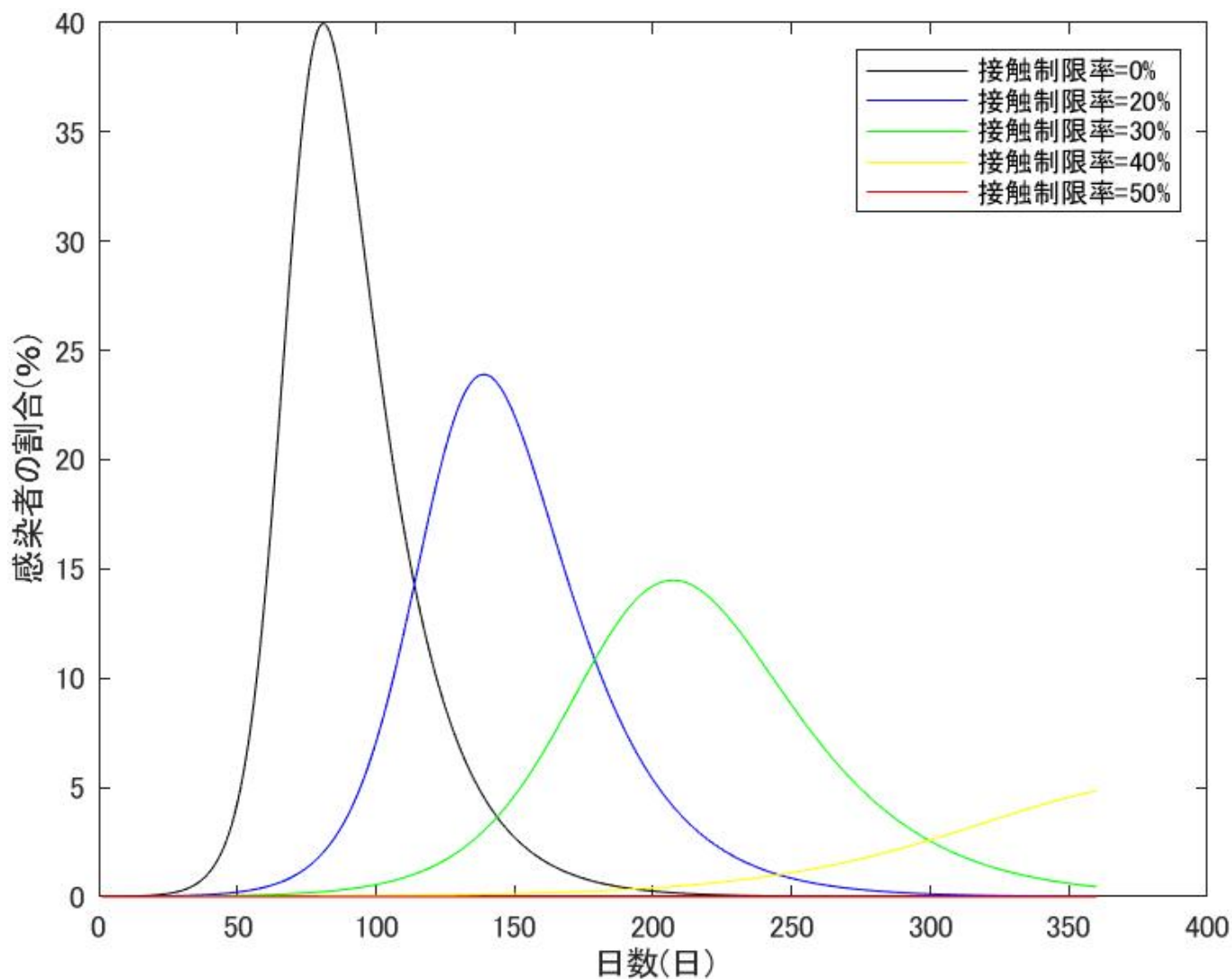
0% から約 40% の接触制限率において制限率が上がるほど、感染者数のピークの時期が遅くなり、ピーク時における感染者数が下がっていることがわかる。接触制限率 30% まではほぼ 1 年以内に収束するのに対して、接触制限率 40% の時収束の時期は大きく遅くなる。制限率約 50% の時には感染者の割合が常にほぼ 0% となっている。



図付録 B.2: シナリオ I における接触制限による経済ダメージ・感染者

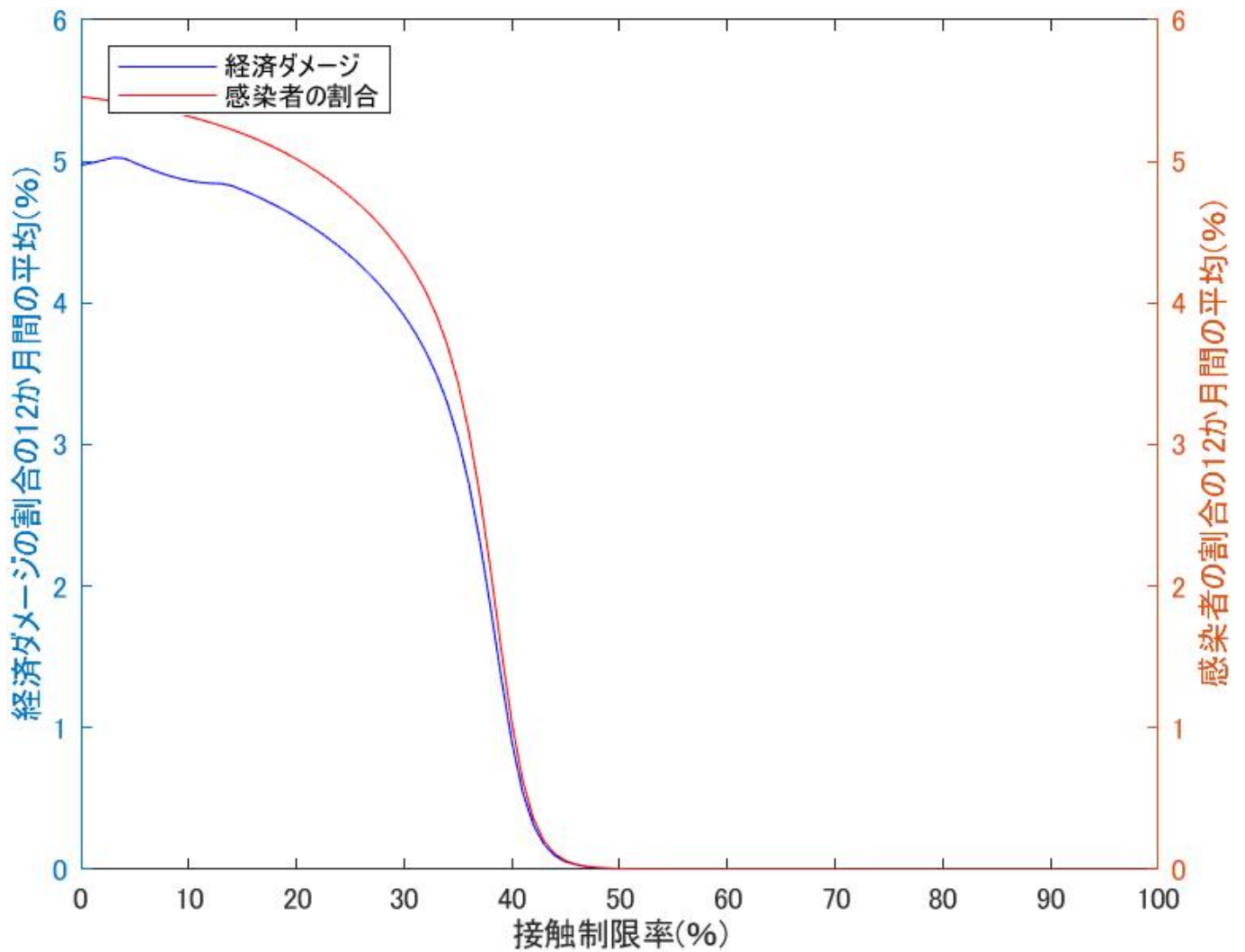
0% から約 45% の接触制限率においては、制限率が上がるほど、経済ダメージ及び感染者数は下がっている。制限率が約 45% の時に経済ダメージ・感染者はともにほぼ 0% になっている。接触制限率が 45% の時、接触機会は $(1 - 0.45)^2 = 0.3025$ つまり接触機会を約 7 割に削減することができれば経済ダメージ・感染者の平均は約 0% に抑えることができる。

B.2 2地域間の移出入率が中程度の社会の場合 (シナリオ II)



図付録 B.3: シナリオ II における接触制限による感染者の割合の推移

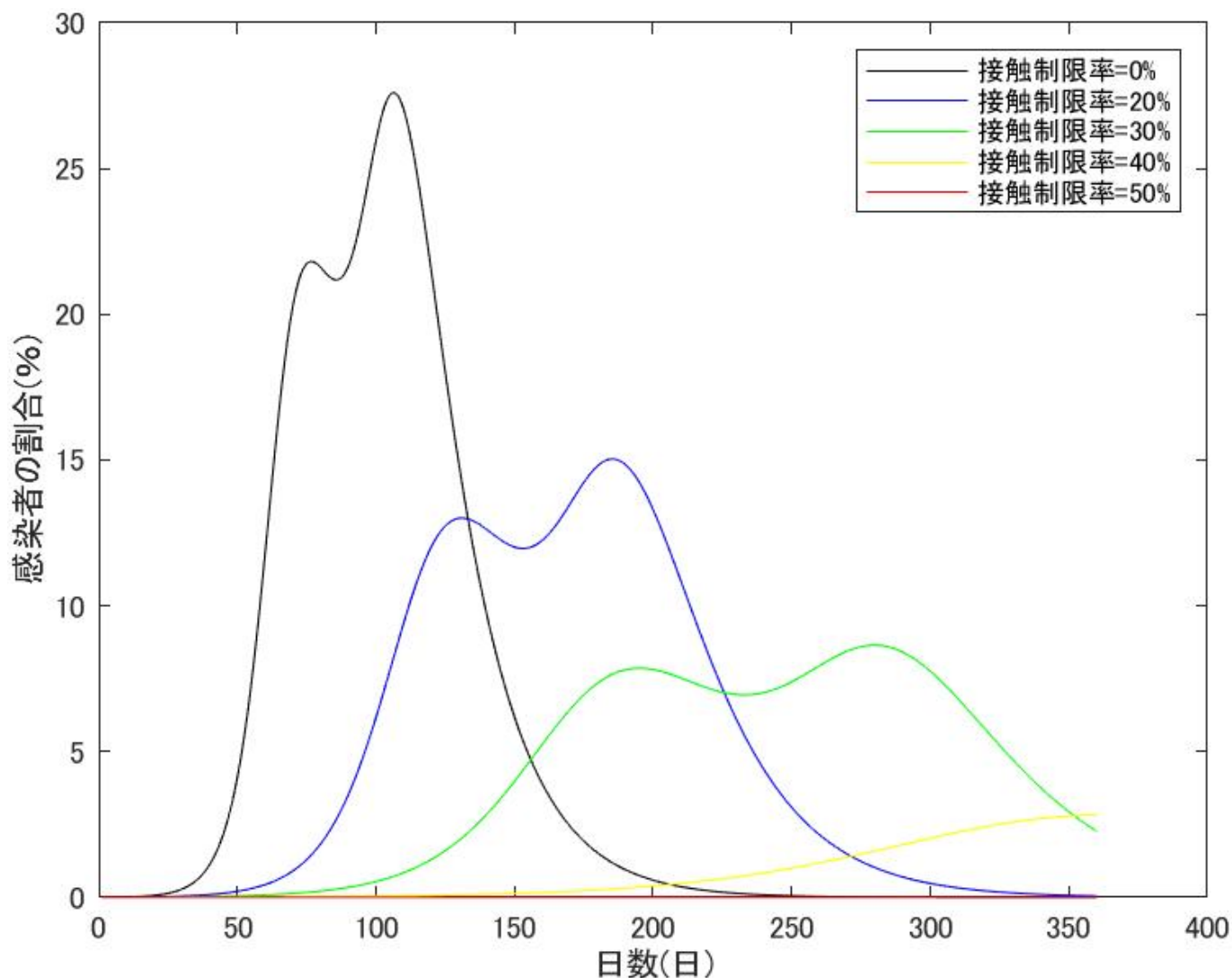
各接触制限率において、シナリオ I とほとんど同様の推移をしている。0% から約 40% の接触制限率において制限率が上がるほど、感染者数のピークの時期が遅くなり、ピーク時における感染者数が下がっていることがわかる。接触制限率 30% まではほぼ 1 年以内に収束するのに対して、接触制限率 40% の時収束の時期は大きく遅くなる。制限率約 50% の時には感染者の割合が常にほぼ 0% となっている。



図付録 B.4: シナリオ II における接触制限による経済ダメージ・感染者

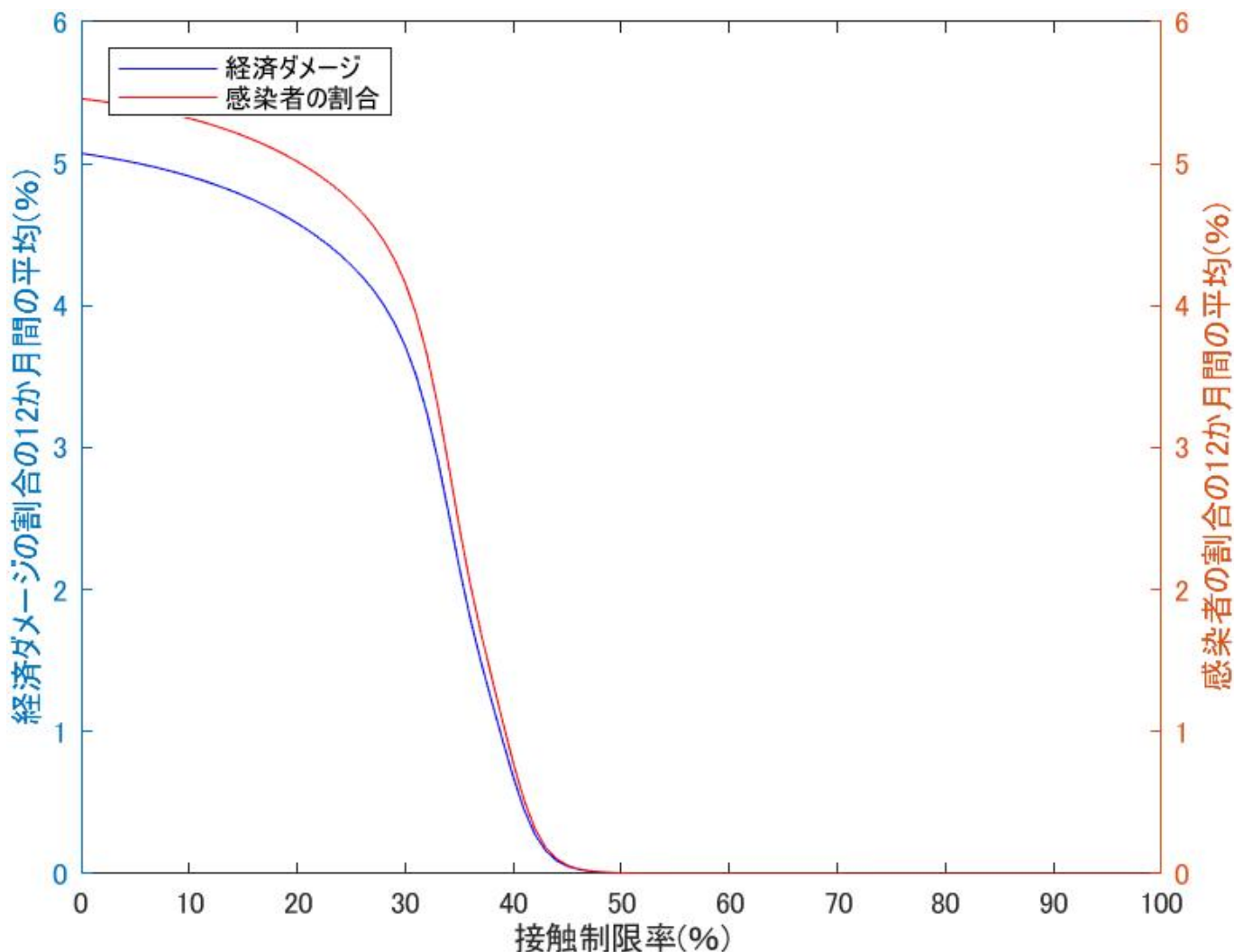
経済ダメージ及び感染者数はシナリオ I とほとんど同様の推移をしている。0% から約 45% の接触制限率においては、制限率が上がるほど、経済ダメージ及び感染者は下がっている。制限率が約 45% の時に経済ダメージ及び感染者数はともにほぼ 0% になっている。接触制限率が 45% の時、接触機会は $(1 - 0.45)^2 = 0.3025$ つまり接触機会を約 7 割に削減することができれば経済ダメージ・感染者の平均は約 0% に抑えることができる。

B.3 2地域間の移出入率が低い社会の場合 (シナリオ III)



図付録 B.5: シナリオ III における接触制限による感染者の割合の推移

シナリオ I やシナリオ II と同様、接触制限率が 0% から約 40% において、制限率が上がるほど感染者数のピークの時期が遅くなり、ピーク時における感染者数が下がっていることがわかる。しかし、ほかのシナリオと比べて各接触制限率における感染者数の割合は低い。接触制限率 30% まではほぼ 400 日以内に収束するのに対して、接触制限率 40% の時収束の時期は大きく遅くなる。制限率約 50% の時には感染者の割合が常にほぼ 0% となっている。



図付録 B.6: シナリオ III における接触制限による経済ダメージ・感染者

経済ダメージ及び感染者はシナリオ I やシナリオ II とほとんど同様の推移をしている。0% から約 45% の接触制限率においては、制限率が上がるほど、経済ダメージ及び感染者は下がっている。制限率が約 45% の時に経済ダメージ及び感染者はともにほぼ 0% になっている。接触制限率が 45% の時、接触機会は $(1 - 0.45)^2 = 0.3025$ つまり接触機会を約 7 割に削減することができれば経済ダメージ及び感染者の平均は約 0% に抑えることができる。

B.4 接触機会の制限による感染者数及び経済ダメージへの影響のまとめ

いずれのシナリオにおいても、接触制限率を高めるほどピーク時における感染者数は低下し、感染者数及び経済ダメージの 12 か月間の平均が大きく低下していることが示された。つまり地域間の移出入が多い場合においても少ない場合においても、お互いの接触を制限することは経済の維持及び感染の抑制に効果があると考えられる。