



The Canon Institute for Global Studies

CIGS Working Paper Series No. 20-005J

# 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

キャノングローバル戦略研究所／東京財団 研究主幹 小林慶一郎  
キャノングローバル戦略研究所 主任研究員／専修大学経済学部 教授 奴田原 健悟

2020.08

※2021年5月11日改定

※Opinions expressed or implied in the CIGS Working Paper Series are solely those of the author, and do not necessarily represent the views of the CIGS or its sponsor.  
※CIGS Working Paper Series is circulated in order to stimulate lively discussion and comments.  
※Copyright belongs to the author(s) of each paper unless stated otherwise.

General Incorporated Foundation

**The Canon Institute for Global Studies**

一般財団法人 キャノングローバル戦略研究所

Phone: +81-3-6213-0550 <http://www.canon-igs.org>

# 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

小林慶一郎

奴田原健悟

東京財団政策研究所 & CIGS & 慶應義塾大学

専修大学 & CIGS

2021 年 5 月 11 日

## 概要

本稿では、感染症拡大モデル（SIR モデル）と経済成長モデル（Solow モデル）を接合したモデルを用いて、行動制限政策と検査隔離政策が感染状況やマクロ経済にどのような影響を与えるかを分析した。第一に、接触 8 割削減 30 日間、接触 7 割削減 60 日間、接触 6 割削減 360 日間の 3 種類の行動制限政策と政策期間によって感染状況がどのように変わるか比較した。いずれの場合も政策導入により、すみやかに感染拡大を抑えられるが、政策終了後一定の時間が空くと感染拡大は再開してしまう。感染開始 1000 日後まででみた総死者数を大きく減らすためには、1 年間などかなり長期にわたる行動制限を続けなければならない、その間の経済損失は非常に大きいことがわかった。第二に、行動制限を短縮し、検査隔離を政策を導入することで感染拡大を抑えつつ、経済損失も抑えられることを示した。とくに、感染に伴う総死者数に上限を与えたうえでの検査費用を除いた経済ロスを最小化するための最適政策を導出したところ、ベースラインの分析では、行動制限は接触 8 割削減（外出を約 55 % 削減することに相当）を 60 日程度継続し、検査隔離は検査強度を最大にして 1 年間継続することが望ましいことがわかった。

キーワード: COVID-19 ; コロナ危機 ; SIR モデル ; 行動制限政策 ; 検査隔離政策

JEL codes: E00; E69

# 1 イントロダクション

2019 年末に発生した新型コロナウイルス感染症（COVID-19）はグローバルな人の移動を背景に全世界にその感染が拡大した。感染拡大防止のために各国で都市のロックダウンが行われ、日本でも接触 8 割削減を目標とした政策が採られた。ロックダウンや接触 8 割削減のような行動制限政策は、感染拡大防止の効果があることは明らかだが、一方でその経済的コストも非常に大きい。そのため、多くの経済学者が COVID-19 についての研究を進めている。<sup>1</sup>

経済学からの COVID-19 の分析には様々なアプローチがあるが、マクロ経済学者から注目を浴びているものに SIR モデルと呼ばれる感染症の数理モデルを用いた分析がある。もっともシンプルな SIR モデルは、(1) 感受性保持者（Susceptible；これから感染する可能性があるもの）、(2) 感染者（Infectious）、(3) 回復者（Recovered；死者も含む）の 3 種類の状態を考え、それが時間を通じて変化する差分方程式（あるいは微分方程式）体系でモデルを記述したものである。SIR モデルはマクロ経済学者が用いる動学マクロ経済モデルと相性がよいため、Atkeson (2020) の先駆的な業績以降、多くのマクロ経済学者が SIR モデルを用いた分析を行うようになってきている。

本稿では、SIR モデルを用いて、行動制限政策と検査隔離政策が感染状況や経済活動にどのような影響を与えるについての分析を行った。本稿で用いるモデルでは、Holtmoeller (2020) と同様に SIR モデルに、経済成長理論として標準的な Solow モデルを接続し、感染拡大だけでなく、経済活動も同時に記述できるようになっている。また、単純な SIR モデルを拡張して、潜伏期や無症状感染者なども考慮できるものになっている。加えて、検査に伴う費用、入院患者数が増加すると感染による死亡率が上昇する可能性（医療限界）についても、モデルの中で考慮している。

---

<sup>1</sup>たとえば、全米経済研究所（NBER）の COVID-19 関連のワーキングペーパーは以下から参照できる。  
<https://www.nber.org/nber-studies-related-covid-19-pandemic-topic-area>.

本稿の主要な内容は以下である。第一に、接触8割削減（外出約55%削減）30日間、接触7割削減（外出約45%削減）60日間、接触6割削減（外出約37%削減）360日間の3種類の行動制限政策と政策期間によって感染状況がどのように変わるか、その効果を比較した。いずれの場合も政策導入によって、すみやかに感染拡大を抑えることができるが、政策終了後一定の時間が空くと感染拡大は再開してしまう。感染開始1,000日後まででみた総死者数を大きく減らすためには、1年間などかなり長期にわたる行動制限を続けなければならない、その間の経済損失は非常に大きいことがわかった。第二に、長期の行動制限の代わりに、検査隔離を政策を導入することで感染拡大を抑えつつ、経済損失も抑えられることを示した。とくに、感染に伴う総死者数に上限を与えたうえでの検査費用を除いた経済ロスを最小化するための最適政策を導出したところ、ベースラインの分析では、行動制限は接触8割削減（外出約55%削減）を60日程度継続し、検査隔離は検査強度を最大にして1年間継続することが望ましいことがわかった。

本稿の分析の大きな特徴は、総死者数に一定の上限を設け、上限を超えないという条件で、経済損失を最小にする政策を最適政策として、最適政策を探索した点にある。Holtmoeller (2020) は、経済厚生を最大化する意味での最適政策は行動制限と検査隔離をミックスした政策となることを発見しているが、最適政策の下での総死者数は増加してしまう。加えて、経済厚生を考えるために消費者の効用関数を仮定しているが、必ずしもモデルとの整合性はとれていない。また、経済損失を最小化する意味での最適政策は行動制限を全く行わないことが望ましいという結果になっている。一方で本稿では、総死者数の上限を制約として考えることで、経済厚生を考えずとも、経済損失を最小化する意味での最適政策は、行動制限と検査隔離をミックスさせたものになることを発見した。また、検査強度の上限に限界がある場合や検査費用が高い場合についてもその結果は頑健であることを示した。<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup>Kobayashi and Nutahara (2021) では、頑健性チェックとして、再感染の可能性がある場合や、潜伏期間であっても他者に感染させる可能性がある場合についても分析を行っている。

経済学の分野に SIR モデルによる分析を持ち込んだ先駆的研究は Atkeson (2020) である。その後、COVID-19 の感染拡大に伴って、多くの経済学者が SIR モデルを用いた分析を行っている。本稿のモデルがベースとしている Holtemoeller (2020) では、SIR モデルに Solow モデルを接続することで経済活動を分析できるようになっている。また、Holtemoeller (2020) は Atkeson (2020) で分析された行動制限政策だけでなく検査隔離政策も導入し、経済厚生を最大化する政策についての分析を行い、行動制限と検査隔離のミックスが望ましいことを明らかにした。Holtemoeller (2020) や本稿のモデルでは、Solow モデルをベースとしているため、経済主体の最適化活動は明示的に考えられていない。一方で Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a, 2020b, 2020c) のように現代マクロ経済学において標準的な動学一般均衡モデルに SIR モデルを接続することで、経済主体の最適化活動も同時に考慮した分析も存在する。<sup>3</sup>とくに Eichenbaum, Rebelo, and Trabandt (2020b) では、検査隔離政策の役割について分析を行っており、本稿との関係も深い。しかしながら、Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020b) では検査費用を考慮していない点が本稿との大きな違いである。

本稿の第 2 節以降の構成は以下である。まず第 2 節でモデルを導入する。第 3 節ではモデルを用いた数値実験を通じて、行動制限政策の効果についての比較を行う。また、総死者数に上限を付けたうえで経済損失を最小化する最適な政策の導出を行う。加えて、検査強度の上限や検査費用を変更することで結果の頑健性もチェックする。最後に、第 4 節で結論を述べる。

---

<sup>3</sup>動学一般均衡モデルを用いる場合、経済主体は各自の感染状況を知っているのか、マクロ経済での感染状況を把握できているのか、など情報の不完全性に関する問題や、自身の行動が経済全体での感染率に与える負の外部性なども考慮する必要がある、その分析は容易ではない。外部性に関する話題は Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a), 情報の不完全性については Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020b) や Hamano, Katayama and Kubota (2020) などで扱われている。

## 2 モデル

### 2.1 ベースライン SIR モデル

古典的な感染症拡大モデル（SIR モデル）は、(1) 感受性保持者（Susceptible；これから感染する可能性があるもの）、(2) 感染者（Infectious）、(3) 回復者（Recovered；死者も含む）の3種類の状態を考えるが、本稿では、Holtemoeller (2020) のモデルをベースに、SIR モデルを拡張した以下のモデルを考える。

まず、初期の人口を 100 とし、それぞれを (1) 感受性保持者（Susceptible；これから感染する可能性があるもの） $S_t$ 、(2) 潜伏期患者（Exposed） $E_t$ 、(3) 症状あり感染者（Symptomatic Infectious） $I_t$ 、(4) 症状なし感染者（Asymptomatic Infectious） $X_t$ 、(5) 入院患者（Hospitalized） $H_t$ 、(6) 回復者（Recovered；回復し、免疫を獲得したもの） $R_t$ 、(7) 死者（Dead） $D_t$ 、の7種類に分かれるとする。モデルの1期間は1日を想定する。

新規感染者は、前期の感受性保持者  $S_{t-1}$  と感染者（ $I_{t-1}$  と  $X_{t-1}$  の和）の積に比例するとすると、感受性保持者  $S_t$  の遷移式は以下で与えられる。

$$\text{感受性保持者：} \quad S_t = S_{t-1} - \bar{\beta} \frac{S_{t-1}(I_{t-1} + \phi_t X_{t-1})}{Pop_0}. \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\beta}$  は新規感染に関するパラメータであり、基準化のために初期人口  $Pop_0$  で全体を除いている。また  $\phi_t$  は症状なし感染者  $X_t$  の  $I_t$  に対する相対的な感染力に関するパラメータである。

潜伏期感染者  $E_t$  は一定割合  $\sigma_I$  が症状あり感染者  $I_t$  および症状なし感染者  $X_t$  に移行するとすると、その遷移式は以下で与えられる。

$$\text{潜伏期感染者：} \quad E_t = E_{t-1} + \bar{\beta} \frac{S_{t-1}(I_{t-1} + \phi_t X_{t-1})}{Pop_0} - \sigma_I E_{t-1}. \quad (2)$$

感染者のうち、 $\xi$  の割合が症状あり  $I_t$ 、それ以外の  $1 - \xi$  の割合が症状なし  $X_t$  とする。また症状ありの場合も症状なしの場合も、 $\gamma_I$  の割合は回復するが、症状ありの感染者は  $\gamma_H$  の

割合で重症化し，入院患者  $H_t$  となる．このとき感染者の遷移式は以下の式で与えられる．

$$\text{症状あり感染者：} \quad I_t = I_{t-1} + \xi\sigma_I E_{t-1} - \gamma_I I_{t-1} - \gamma_H I_{t-1}, \quad (3)$$

$$\text{症状なし感染者：} \quad X_t = X_{t-1} + (1 - \xi)\sigma_I E_{t-1} - \gamma_I X_{t-1}. \quad (4)$$

入院患者は  $\delta_H$  の割合が回復するが， $\mu_t$  の割合は死亡してしまうとする．このとき入院患者  $H_t$ ，回復者  $R_t$ ，死者  $D_t$  の遷移式は以下で与えられる．

$$\text{入院患者：} \quad H_t = H_{t-1} + \gamma_H I_{t-1} - \delta_H H_{t-1} - \mu_t H_{t-1}, \quad (5)$$

$$\text{回復者：} \quad R_t = R_{t-1} + \gamma_I (I_{t-1} + X_{t-1}) + \delta_H H_{t-1}, \quad (6)$$

$$\text{死者：} \quad D_t = D_{t-1} + \mu_t H_{t-1}. \quad (7)$$

本稿では，医療限界を考慮するため，死亡率（Case fatality rate） $\mu_t$  は人口に対する入院患者数の増加関数とし，以下の式で与えられるとする．

$$\mu_t = \bar{\mu} + b_\mu \left( \frac{H_{t-1}}{Pop_{t-1}} \right)^2. \quad (8)$$

最後に総人口  $Pop_t$  は以下で定義される．

$$Pop_t = Pop_0 - D_t = S_t + E_t + I_t + X_t + H_t + R_t. \quad (9)$$

## 2.2 SIR-Solow モデル

さきほどのベースラインモデルは，感染者数のダイナミクスをとらえる差分方程式体系であるが，経済活動を考えられるように Solow モデルをドッキングさせる。<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup>Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a, 2020b, 2020c) などのように経済主体の最適化行動をベースに労働供給量などが変化するようにモデル化することも考えられるが，ここではできるだけシンプルなモデルでの分析を行うため，Solow モデルを用いる．

集計生産関数はコブ・ダグラス型とし、以下の式で与えられる。

$$Y_t = A_t K_t^\alpha N_t^{1-\alpha}. \quad (10)$$

ただし、 $A_t$  は全要素生産性、 $K_t$  は資本投入量、 $N_t$  は労働投入量であり、 $\alpha$  は資本のコストシェアを表す。全要素生産性は一律で成長し、年間の成長率を  $\gamma_A$  とすると、その遷移式は以下で与えられる。<sup>5</sup>

$$A_t = A_{t-1}(1 + \gamma_A)^{1/360} \quad (11)$$

労働投入量  $N_t$  は、人口  $Pop_t$  のうち入院していないものとし、 $\lambda$  を労働力人口の割合とすると

$$N_t = \lambda(Pop_t - H_t), \quad (12)$$

となる。

貯蓄率は  $\gamma_K$  で一定とすると、消費  $C_t$  は以下で与えられる。

$$C_t = (1 - \gamma_K)Y_t. \quad (13)$$

また、1年間の資本減耗率を  $\delta$  とすると、資本ストック  $K_t$  の遷移式は以下となる。

$$K_t = (1 - \delta)^{1/360} K_{t-1} + \gamma_K Y_{t-1}. \quad (14)$$

## 2.3 行動制限政策・検査隔離政策の導入

ここで、先ほどまでのモデルに行動制限政策（接触削減政策）および検査隔離政策を導入する。

---

<sup>5</sup>ここでは Holtemoeller (2020) にしたがって、1年間=360日と設定する。



まず、行動制限政策とは、「感受性保持者・潜伏期感染者・症状ありなし感染者を問わず、一律に  $\nu_t$  の割合でその行動を制限する政策」とする。このとき、感受性保持者  $S_t$  も感染者 ( $I_t$  と  $X_t$ ) もその行動を  $\nu_t$  の割合減らすため、お互いの接触が減り、新規感染者は行動制限政策がない場合の  $(1-\nu_t)^2$  に留まることになる。これは例えば接触8割制限であれば、 $(1-\nu)^2 = 0.2$  なので  $\nu = 0.5528$ 、つまり外出を約55%削減することに相当することを意味する。以上を踏まえると、感受性保持者  $S_t$  および潜伏期感染者  $E_t$  の遷移式は以下のようになる。

$$\text{感受性保持者：} \quad S_t = S_{t-1} - \bar{\beta}(1-\nu_t)^2 \frac{S_{t-1}(I_{t-1} + \phi_t X_{t-1})}{Pop_0}, \quad (15)$$

$$\text{潜伏期感染者：} \quad E_t = E_{t-1} + \bar{\beta}(1-\nu_t)^2 \frac{S_{t-1}(I_{t-1} + \phi_t X_{t-1})}{Pop_0} - \sigma_I E_{t-1}. \quad (16)$$

また、検査隔離政策とは、「人口のうち、入院患者・回復者の除いたものの  $\theta_t$  の割合を検査し、発見した陽性者を通常の適切な場所で待機してもらうことで、社会経済活動から隔離させる政策」とする。そこで、モデルの状態の感染者を症状があるかないかだけではなく、検査によって陽性が判明したか検査を受けていないかに応じて分けることにする。 $I_t$  は無検査症状あり感染者、 $\tilde{I}_t$  は検査済症状あり感染者、 $X_t$  は無検査症状なし感染者、 $\tilde{X}_t$  は検査済症状なし感染者とする。検査済みの感染者である  $\tilde{I}_t + \tilde{X}_t$  は隔離され、その数を  $U_t$  とする。検査済み感染者  $U_t$  のうち  $\delta_U$  の割合が回復するとする。

このとき、各感染者の遷移式は以下で与えられる。

$$\text{無検査症状あり感染者：} \quad I_t = I_{t-1} + \xi \sigma_I E_{t-1} - \gamma_I I_{t-1} - \gamma_H I_{t-1} - \theta_t I_{t-1}, \quad (17)$$

$$\text{検査済症状あり感染者：} \quad \tilde{I}_t = \tilde{I}_{t-1} + \theta_t I_{t-1} - \gamma_H \tilde{I}_{t-1} - \delta_U \tilde{I}_{t-1}, \quad (18)$$

$$\text{無検査症状なし感染者：} \quad X_t = X_{t-1} + (1-\xi) \sigma_I E_{t-1} - \gamma_I X_{t-1} - \theta_t X_{t-1}, \quad (19)$$

$$\text{検査済症状あり感染者：} \quad \tilde{X}_t = \tilde{X}_{t-1} + \theta_t X_{t-1} - \delta_U \tilde{X}_{t-1}. \quad (20)$$

また入院患者・回復者・総人口は以下のような式であらわされる。

$$\text{入院患者：} \quad H_t = H_{t-1} + \gamma_H(I_{t-1} + \tilde{I}_{t-1}) - \delta_H H_{t-1} - \mu_t H_{t-1}, \quad (21)$$

$$\text{回復者：} \quad R_t = R_{t-1} + \gamma_I(I_{t-1} + X_{t-1}) + \delta_U(\tilde{I}_{t-1} + \tilde{X}_{t-1}) + \delta_H H_{t-1}, \quad (22)$$

$$\text{総人口} \quad Pop_t = Pop_0 - D_t = S_t + E_t + I_t + X_t + \tilde{I}_t + \tilde{X}_t + H_t + R_t. \quad (23)$$

行動制限された人や隔離された感染者は経済活動に参加できないため、この政策の下での労働投入  $N_t$  は以下で与えられる。

$$N_t = (1 - \nu_t)\lambda(Pop_t - H_t - U_t). \quad (24)$$

最後に、検査のコストは1件あたり  $\Phi$  とし、総検査費用  $T_t$  は以下で与えられるとする。

$$T_t = \theta_t(S_t + E_t + I_t + X_t)\Phi. \quad (25)$$

## 3 主要分析

### 3.1 パラメータ値の設定

モデルのパラメータ値の多くは、Holtemoeller (2020) と同じものを用いている。Wang et al. (2020) によると、COVID-19の感染期間は2.3日、潜伏期間は5.2日のため、 $\gamma_I = 1/2.3$  および  $\sigma_I = 1/5.2$  とする。World Health Organization (2020) によると、中国では感染の80%が軽症者で入院期間が14日程度だったのに対し、重篤患者の入院期間は3~6週間程度になっている。そこで加重平均をとって  $0.8 \times 14 + 0.2 \times 31.5 = 17.5$  を入院期間とする。よって、 $\delta_H = 1/17.5$  に設定する。Li et al. (2020) の推計によると、中国では総感染者のうち86%は検査を受けてないと考えられるため、 $\xi = 1/8$  と設定する。 $\bar{\beta}$  は、基本再生産数が  $R^0 = \bar{\beta}/\gamma_I = 2.3$  となるように設定した。症状なし感染者の相対的な感染力は  $\phi_t = 1$  とする。

また, Holtemoeller (2020) にならい,  $\gamma_H = 1/7$  とし, 潜伏期感染者・症状ありなしの感染者の初期値はそれぞれ  $E_1 = 0.1393$ ,  $I_1 = 0.0087$ ,  $X_1 = 0.0610$  とした.

死亡率の関数形は Holtemoeller (2020) とは異なるが, 医療限界を考慮し, 入院患者数の二次関数としている. ここでは,  $\bar{\mu} = 0.02$  とし,  $b_\mu$  は  $H_t/Pop_t = 0.001$  のときに  $\mu_t = 0.1$  となるように設定した.

また, Solow モデル部分のパラメータも Holtemoeller (2020) にならい, 資本のコストシェア  $\alpha = 0.36$ , 貯蓄率 (投資の対 GDP 比)  $\gamma_K = 0.21$ , 全要素生産性の年間成長率  $\gamma_A = 0.005$ , 資本減耗率  $\delta = 0.035$ , 労働力率  $\lambda = 0.545$  と設定した. 全要素生産性の初期値  $A_1$  は, 初期の生産  $Y_1 = 100$  かつ初期以前において Solow モデルの定常状態が達成されているように設定した.

検査費用は,  $\Phi = 0.1$  をベースラインとする. Holtemoeller (2020) は,  $\Phi = 3.3 \cdot 10^{-5}$  という非常に小さな値を選んでいるが, われわれの分析では, 人口全体への検査費用は GDP の 10%だと想定し  $\Phi = 0.1$  としている.<sup>6</sup>また第 3.5 節の頑健性チェックでは,  $\Phi = 0.3$  の場合も考慮する.

### 3.2 行動制限政策と政策期間の効果の比較

まず, 行動制限政策とその政策期間の効果と比較を行う. 具体的には, (1) 接触 8 割削減政策を 30 日継続, (2) 接触 7 割削減政策を 60 日継続, (3) 接触 6 割削減政策を 360 日継続, の 3 つの効果と比較する. いずれも政策は第 30 日目に開始するとする. ここで, 接触 8 割

---

<sup>6</sup>(25) 式を変形すると

$$\frac{T_t}{Y_t} = \theta_t \frac{S_t + E_t + I_t + X_t}{Y_t} \Phi$$

ここで初期では  $Y_1 = 100$  かつ, 人口全体が  $Pop_1 = S_1 + E_1 + I_1 + X_1 = 100$  とする. このとき  $\theta_1 = 1$  は人口全体に検査を行うことを意味するので,  $\Phi = \frac{T_1}{Y_1}$  となり,  $\Phi$  は初期における人口全体への検査費用の対 GDP 比として解釈できる.

削減とは、(15)式でもみたように、 $(1 - \nu_t)^2 = 1 - 0.8$  となることであり、例えば(1)の政策では、第30日目から30日間  $\nu_t = 0.5582$  とし、それ以外は  $\nu_t = 0$  と設定した。ただし、この実験では検査は考えないことし、 $\theta_t = 0$  と設定している。

図1は第60日まで、図2は第720日までのそれぞれ感染者数、総死者数、GDPをプロットしたものである。感染者数はいわゆる Active Cases とし、 $I_t + X_t + H_t$  で定義している。総死者数は  $D_t$ 、GDP は  $Y_t$  である。図1が示すように、接触削減政策が実施されている間は、その強度に応じた感染防止の効果がみられる。しかし、図2の感染者数の推移が示すように、政策終了後には、一定の時差をともしつつも、感染拡大が再開することが分かる。30日間接触8割削減のケースでは、政策終了後すみやかに感染拡大が再開し、第112日（政策終了後、52日目）には感染爆発のピークを迎える。60日間接触7割削減のケースでも、政策終了後、間を置かずに感染が再拡大し、第159日（政策終了後、69日目）に感染爆発のピークとなる。360日間接触6割削減のケースでは、政策終了後、かなり長い時間感染再拡大は見られないが、第600日あたりから感染拡大が大きくなり、第683日（政策終了後、293日目）に感染爆発のピークとなる。第1000日までの総死者数でみると、政策介入なしの場合は総人口の2.1%が死亡するのに対し、30日間接触8割削減のケースでは1.7%、60日間接触7割削減のケースでは1.6%、360日間接触6割削減のケースでは0.6%となった。

これらの結果から、行動制限を1か月続けるか2か月にするかでは、死亡者数にはあまり大きな違いを生じず、政策終了後、時差を伴って感染が再拡大してしまうことが分かる。これは行動制限政策がワクチンや有効な治療方法が開発されるまでの時間稼ぎに過ぎないことを意味している。一方で、1年間接触削減を続ければ（少なくとも1000日目までの間は）かなり死者数を減らすことができるが、1年間も行動制限を続ければ、マクロ経済への大きなダメージが危惧される。

[図1, 図2を挿入]

### 3.3 行動制限政策と検査隔離政策の代替性

これまで行動制限政策の効果を見てきたが、行動制限政策だけで感染拡大を防ぐ政策は長期間の行動制限が必要となり、経済へのダメージが非常に大きい。そこで行動制限の代わりに、検査隔離政策を行うことが考えられる。

(15) 式にあるように、新規感染者は

$$\bar{\beta}(1 - \nu_t)^2 \frac{S_{t-1}(I_{t-1} + \phi_t X_{t-1})}{Pop_0}$$

で決まるが、前期の検査強度  $\theta_{t-1}$  を適切に設定すると、(17) 式と (19) 式を通じて、 $I_{t-1}$  と  $X_{t-1}$  が減少するため、 $\nu_t$  と同様の新規感染者数に抑えることができる。また、この場合、 $\nu_t$  はより低い値で済むため、(24) 式で定義される労働供給は増加し、経済活動のロスを抑えることも可能となる。

### 3.4 行動制限と検査隔離の最適政策パッケージ

接触8割削減 ( $(1 - \nu)^2 = 1 - 0.8$ ) を第30日目から開始し、それを360日継続した際の総死者数は0.2829%となる。ここではこの総死者数を超えないことを条件として、最も経済ロスが小さい政策パッケージ（行動制限と検査隔離の組み合わせ）を考える。また80%接触削減を360日継続したとき、感染が全く起きなかった場合に比べての経済ロスは20.69%となるが、検査隔離を組み合わせることでどれだけ経済的な被害を抑え込めるかをみる。

この実験では、接触削減パラメータ  $\nu_t$  は0から0.55の間で0.05刻みで、接触削減期間は0日間から360日間までを30日刻みで、検査強度  $\theta$  は0から1まで0.1刻みで、検査強化期間は0日間から360日間までを30日刻みで変化させて、その間の経済ロス、総死者数をシミュレーションして分析行う。これまで同様、第30日目から政策を開始し、720日間シミュレーションし、経済ロスを計算する。検査費用を考慮するため、経済ロスは感染が全くなかった場合のGDP（検査費用を引いたもの）からの乖離率として計算する。

表1は、最適な政策パッケージの結果である。この表によると、経済ロスを最小にするためには、接触削減は $\nu = 0.3$  ( $(1 - 0.3)^2 = 0.49$ なので接触5割削減程度)を90日間行う程度にとどめておき、検査は最大の $\theta = 1$ まで上げてそれを1年間継続するのが望ましい。このときの経済ロスは、7.25%となっており、80%接触削減を360日継続したときの経済ロス20.69%よりもかなり小さくて済むことが分かる。

### 3.5 頑健性

前小節で、行動制限と検査隔離を組み合わせることで、総死者数を360日間接触8割削減を維持したとき以下に抑え込みつつ、経済ロスを抑えることができることが明らかになった。ここでは、さきほどの設定を変更することで、この結果の頑健性を確認する。

(1) 検査強度 $\theta$ の上限値が低いケース 前小節の実験では $\theta$ の上限値を1と設定していた。 $\theta_t = 1$ は感染が判明していない人口全員の検査を行うことを意味するため、現実に行うことは必ずしも簡単ではない。そこでここでは、 $\theta$ の上限値をより低い値(0.25と0.1)に設定した場合の結果を確認する。数値実験において $\theta$ のグリッドは0.01刻みとし、それ以外の設定は前小節と全く同じである。

表2は、 $\theta$ の上限に制約を課した場合の最適な政策パッケージの実験結果である。 $\theta$ の上限が0.25の場合、総死者数を接触8割削減を360日間継続する場合を越えない範囲で、経済ロスを最小化する政策は、 $\nu = 0.45$ を330日間継続し、検査強度は $\theta = 0.25$ を330日間継続するのが望ましい。このときの経済ロスは16.07%となる。また、 $\theta$ の上限が0.1の場合、総死者数を接触8割削減を360日間継続する場合を越えない範囲で、経済ロスを最小化する政策は、 $\nu = 0.55$ を330日間継続し、検査強度は $\theta = 0.08$ を120日間継続するのが望ましい。このときの経済ロスは19.00%となる。

経済ロスを最小化するための政策継続日数などは  $\theta$  の上限値によって変化するものの、いずれの場合も、行動制限だけでなく、検査隔離を行うことが経済ロスを抑えるのに有効であることが分かる。

(2) 検査費用  $\Phi$  が高いケース 前小節の実験では、検査費用は  $\Phi = 0.1$  を想定していた。ここでは検査費用がベースラインの3倍にあたる  $\Phi = 0.3$  とし、結果の頑健性を確認する。パラメータの値や実験方法に関してはこれまでと同様とする。

表3は、検査費用が  $\Phi = 0.3$  の場合の最適な政策パッケージの実験結果である。 $\theta$  の上限が1の場合（上限の制約がない場合）、総死者数を接触8割削減を360日間継続する場合を越えない範囲で、経済ロスを最小化する政策は、 $\nu = 0.3$  を180日間継続し、検査強度は  $\theta = 0.8$  を360日間継続するのが望ましい。このときの経済ロスは15.87%となる。また、 $\theta$  の上限が0.25の場合、総死者数を接触8割削減を360日間継続する場合を越えない範囲で、経済ロスを最小化する政策は、 $\nu = 0.5$  を300日間継続し、検査強度は  $\theta = 0.18$  を360日間継続するのが望ましい。このときの経済ロスは17.76%となる。最後に、 $\theta$  の上限が0.1の場合、総死者数を接触8割削減を360日間継続する場合を越えない範囲で、経済ロスを最小化する政策は、 $\nu = 0.55$  を330日間継続し、検査強度は  $\theta = 0.04$  を240日間継続するのが望ましい。このときの経済ロスは19.23%となる。

上記の結果は、 $\Phi = 0.1$  の場合と大きな違いはなく、やはり行動制限だけでなく、検査隔離を行うことが経済ロスを抑えるのに有効であることを示唆している。

## 4 結論

本稿では、感染症拡大モデル（SIRモデル）と経済成長モデル（Solowモデル）を接合したモデルを用いて、行動制限政策と検査隔離政策が感染状況やマクロ経済にどのような影響

を与えるかを分析した。第一に、接触 8 割削減 30 日間、接触 7 割削減 60 日間、接触 6 割削減 360 日間の 3 種類の行動制限政策と政策期間によって感染状況がどのように変わるか、その効果を比較した。いずれの場合も政策導入によって、すみやかに感染拡大を抑えることができるが、政策終了後一定の時間が空くと感染拡大は再開してしまう。感染開始 1,000 日後まででみた総死亡者数を大きく減らすためには、1 年間などかなり長期にわたる行動制限を続けなければならず、その間の経済損失は非常に大きいことがわかった。第二に、長期の行動制限の代わりに、検査隔離を政策を導入することで感染拡大を抑えつつ、経済損失も抑えられることを示した。とくに、感染に伴う総死者数に上限を与えたうえでの検査費用を除いた経済ロスを最小化するための最適政策を導出したところ、ベースラインの分析では、行動制限は接触 8 割削減を 60 日程度継続し、検査隔離は検査強度を最大にして 1 年間継続することが望ましいことがわかった。

本稿の分析はいくつかの課題も存在する。一つはパラメータの値である。モデルの多くのパラメータは先行研究に沿ったものを選んでいますが、必ずしも日本のデータに当てはめたものではないため、定量的インプリケーションを直接日本経済に適用することには慎重になる必要があるかもしれない。もう一つは、モデルそのものに関する課題である。本稿では、分析の簡便化のために、非常にシンプルな Solow モデルを SIR モデルと接合した。一方で、Eichanbaum, Rebelo and Trabandt (2020a, 2020b, 2020c) のように、経済主体が最適化行動を行う動学一般均衡モデルと SIR モデルを接合した研究も存在する。政策変更に伴う経済主体の最適化行動の変化をとらえた政策効果の予測の行うためには、ルーカス批判が示すように動学一般均衡モデルを用いることが望ましい。そのため、動学一般均衡モデルを用いつつ、本稿の結論がなお頑健であるかの分析は今後の課題といえる。



## 参考文献

- [1] Atkeson Andrew, G. 2020. What will be the economic impact of COVID-19 in the US? Rough estimates of disease scenarios. NBER Working Paper No. 26867.
- [2] Eichenbaum, Martin S., Sergio Rebelo, Mathias Trabandt. 2020a. The Macroeconomics of Epidemics. NBER Working Paper No. 26882.
- [3] Eichenbaum, Martin S., Sergio Rebelo, Mathias Trabandt. 2020b. The Macroeconomics of Testing and Quarantining. NBER Working Paper No. 27104.
- [4] Eichenbaum, Martin S., Sergio Rebelo, Mathias Trabandt. 2020c. Epidemics in the Neoclassical and New Keynesian Models. NBER Working Paper No. 27430.
- [5] Hamano, Masashige, Munechika Katayama, So Kubota. 2020. A Macroeconomic Analysis of COVID-19: Imperfect Information and Testing. mimeo.
- [6] Holtmoeller, Oliver. 2020. Integrated Assessment of Epidemic and Economic Dynamics. IWH Discussion Papers No. 4/2020.
- [7] Kobayashi, Keiichiro, Kengo Nutahara. 2021. A Comparison of Behavior-Restriction and Test-and-Isolate Policies using an Epidemiological Model. CIGS Working Paper.
- [8] Li, R., Pei, S., Chen, B., Song, Y., Zhang, T., Yang, W., Shaman, J., 2020. Substantial undocumented infection facilitates the rapid dissemination of novel coronavirus (SARS-CoV2). *Science*.
- [9] Wang, C., Liu, L., Hao, X., Guo, H., Wang, Q., Huang, J., He, N., Yu, H., Lin, X., Pan, A., Wei, S., Wu, T., 2020. Evolving epidemiology and impact of non-pharmaceutical interventions on the outbreak of coronavirus disease 2019 in Wuhan, China. *medRxiv* .

- [10] World Health Organization, 2020. Report of the WHO-China joint mission on coronavirus disease 2019 (COVID-19).

表 1: 最適な政策パッケージ (1)

接触削減		検査強化		政策効果	
期間	$\nu$	期間	$\theta$	経済ロス	総死者
90	0.3	360	1	7.25%	0.2732%

表 2: 最適な政策パッケージ (2) :  $\theta$  に上限がある場合

$\theta \leq 0.25$ の場合					
接触削減		検査強化		政策効果	
期間	$\nu$	期間	$\theta$	経済ロス	総死者
330	0.45	330	0.25	16.07%	0.2823%
$\theta \leq 0.1$ の場合					
接触削減		検査強化		政策効果	
期間	$\nu$	期間	$\theta$	経済ロス	総死者
330	0.55	120	0.08	19.00%	0.2820%

表 3: 最適な政策パッケージ (3) : 検査費用が高い場合

ベースライン ( $\theta$ に制約なし)					
接触削減		検査強化		政策効果	
期間	$\nu$	期間	$\theta$	経済ロス	総死者
180	0.3	360	0.8	15.87%	0.2732%
$\theta \leq 0.25$ の場合					
接触削減		検査強化		政策効果	
期間	$\nu$	期間	$\theta$	経済ロス	総死者
300	0.5	360	0.18	17.76%	0.2801%
$\theta \leq 0.1$ の場合					
接触削減		検査強化		政策効果	
期間	$\nu$	期間	$\theta$	経済ロス	総死者
330	0.55	240	0.04	19.23%	0.2822%

図 1: 行動制限政策の効果 (1) : 第 60 日目まで

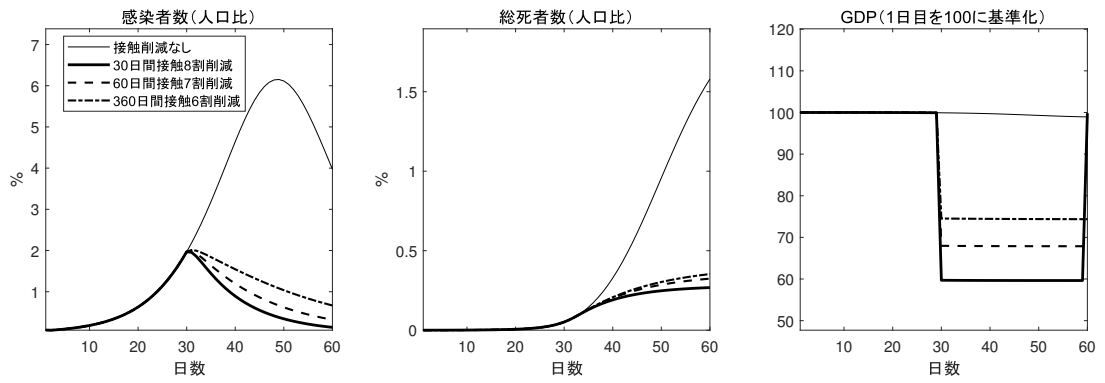


図 2: 行動制限政策の効果 (2) : 第 720 日目まで

