

CIRJE-J-299

感染症対策の厚生経済学：解説

東京大学大学院経済学研究科
岩本康志

2021年1月

CIRJE ディスカッションペーパーの多くは
以下のサイトから無料で入手可能です。
http://www.cirje.e.u-tokyo.ac.jp/research/03research02dp_j.html

このディスカッション・ペーパーは、内部での討論に資するための未定稿の段階にある論文草稿である。著者の承諾なしに引用・複写することは差し控えられたい。

感染症対策の厚生経済学：解説

岩本 康志

東京大学大学院経済学研究科

2021年1月

Welfare Economics of Managing Epidemic: An Exposition

Abstract

This paper reviews recent findings on the normative analysis of infectious disease control by the government and the private sector, with COVID-19 in mind. A welfare maximizing framework that links economic activity with infectious disease epidemics provides a theoretical basis for designing policies that take health and the economy into account simultaneously. Since restricting economic activity limits the spread of infectious diseases, there is a trade-off between health and economy. Lockdowns in many countries restrained economic activity on a wide scale, and the economic damage they cause is enormous.

Compared to uniform restriction of activities, it may be possible to improve efficiency by taking measures to restrict activities by selecting targets. Some attributes are identified at very low cost, such as age or industry, and others are identified at non-negligible cost, such as close contact with an infected person or the presence of a pathogen. Under each of these measures, there is a trade-off between health and economy in the sense that trying to reduce human damage will result in economic damage, but it is possible to reduce both human and economic damage in comparison with uniform restrictions. There is no trade-off between across-the-board restrictions and targeted restrictions.

感染症対策の厚生経済学：解説
(Welfare Economics of Managing Epidemic: An Exposition)

岩本 康志

要 約

本稿は、新型コロナウイルス感染症の流行を念頭に、民間と政府を合わせた感染症対策の規範分析に関する最近の知見を解説する。経済活動と感染症の流行を関係づけたモデルに基づき、社会の厚生を最大化する政策を考えることで、健康と経済を同時に考慮した対策を設計する理論的基礎が与えられる。経済活動を制限すると、感染症の流行も抑制され、そこに健康と経済のトレードオフが存在する。各国でとられた都市封鎖は、広範囲に経済活動を制限する政策であり、その経済的被害は極めて大きかった。

一律の活動制限と比較して、対象を選別して活動を制限する対策をとることで、効率性を高めることができる可能性がある。対象を選別するための属性には、年齢や産業のような、費用がほぼかからず識別できるものや、感染者との濃厚接触や病原体保有の有無のような、費用をかけないと識別できないものがある。それぞれの対策のもとでは、人的被害を減らそうとすると、経済的被害が生まれるという意味での健康と経済のトレードオフが存在するが、一律の活動制限との比較では人的被害と経済的被害の両方を軽減することが可能になる。一律の活動制限と選択的な活動制限とは、トレードオフの関係ではない。

1. 序論

本稿は、新型コロナウイルス感染症流行後に急速に発展した経済分析のなかで、感染症に対する民間の経済主体の予防行動と政府による公衆衛生的介入（Non-Pharmaceutical Intervention）の便益と費用を評価する分析枠組みを解説する。

日本での新型コロナウイルス感染症対策は、2020年5月末の緊急事態宣言の解除に至るまでは、諸外国で行われた都市封鎖（lockdown）のような強硬な手段をとらずに、非常に低い死者数で第1波を抑え込むことができた。ここまでの対策の立案には、2月14日に設置された新型コロナウイルス感染症対策専門家会議の分析と助言が大きな影響力をもったと考えられる。しかし、疫学には感染症の流行を記述するモデルや、対策の効果を検証するモデルはあっても、感染症対策の経済的な費用を勘案するモデルはない。感染症の専門家が専門的見地に忠実であろうとすれば、経済度外視の助言が出てくることになる。

新型コロナウイルス感染症では、感染症と感染症対策がもたらした経済損失は歴史的にも巨額のものとなり、1918年から流行したスペイン風邪をしのぎ、その他の経済的ショックを加えても大恐慌以来の大きな経済的ショックになるとされている。金融危機や天災などへの政策対応では、起こってほしくないショックが起こったときに、どのようにそのショックを緩和していくかを考えていく。しかし、戦争と疫病では、別の目的のために自らの意思で経済を犠牲にするところが他の経済ショックと違うところである。戦争で一国の存亡がかかるときには、経済に配慮する余裕はないかもしれないが、新型コロナウイルス感染症の場合は、健康と経済のトレードオフの間での選択が、重要な政策課題である。

経済学は経済だけを考えていて、経済学者が専門的見地に忠実であれば、経済優先で健康度外視の助言が出てくるというわけではない。経済学では個人の選好を政策の評価基準に置くので、個人が健康と経済の両方に価値を置くなら、政策の評価基準に健康と経済の両方が考慮される。そして、感染症の流行と経済活動の関係がモデル化できれば、健康と経済のトレードオフでの望ましい選択を考えることができる。本稿の目的は、そのような考え方を解説することである。

本稿では、マクロ経済学での均衡景気循環理論（RBC）モデルと疫学での感染症流行を記述するSIRモデル（Kermack and McKendrick 1927）を接合して、健康と経済のトレードオフを表現する最近の研究の知見を整理して、望ましい感染症対策のあり方を検討する。疫病と経済は、以下の2つの経路でモデルのなかで関係づけられる。第1に、疫学モデルでは疫病の流行速度が人々の接触機会と関係づけられているが¹、この接触機会と経済活動を関係

* 本稿の作成に当たっては、文部科学省科学研究費補助金（研究活動スタート支援）20K22086の助成を受けた。

¹ 本稿では、新型コロナウイルス感染症の世界的流行に関心があるので、ヒトからヒトへの感染のみに関心をしぼる。

づけることで、感染症の流行と経済活動が関係づけられる。第2に、代表的個人の通時的最適化問題から、感染症と感染症対策の影響に経済的被害と人的被害の影響があることを導く。こうして、感染症対策は、経済活動を制限して感染率を抑止する政策として記述され、人的被害を軽減するが、経済的被害をもたらすものとして特徴づけられる。

新型コロナウイルス感染症に関する経済分析の本格的展開はまだ歴史が浅いものの、すでに大量の研究が発表されている。本稿は、学界の研究動向を網羅的に展望するものではなく、望ましい感染症対策を健康と経済のトレードオフの観点からどのように位置付ければよいか、という問題意識にしばって、それを表現できるモデルを構築し、関係する研究の知見を解説する²。したがって、ここで解説される研究は、感染症の経済分析のごく一部に限られる。

また、その問題意識の範囲内でも、過度な複雑化を避けるために、多くの単純化の仮定を置いている。なかでも重要なものに、代表的個人を厚生評価の基準としていることである。これによって、感染者と非感染者の効用の違いや、現実には経済的ショックが弱者に偏っているという問題が考慮されていない。モデルのなかでは、これらの不均質な負担を平準化する所得再分配政策が実行されていると暗黙に想定している。言い換えると、本稿で考察する感染症対策は、こうした所得再分配政策を（明示しないが）暗黙に含むものである。

感染症対策での健康と経済のトレードオフについては、モデルの定性的構造はほぼ確立したが、急速に研究が進展したとはいえ、短い時間のなかで頑健な定量化ができたとはいえない。このため、望ましい都市封鎖は何週間か、という問いについて、確かな答を与えることは現状では難しい。本稿では、定性的な帰結や、どのようなパラメーターが結果に影響を与えるのかの側面を重視して解説する。また、感染症対策のシミュレーション分析結果をいくつか紹介するが、それらの定量的な情報は確定したものと解釈するのではなく、今後の研究で改められる可能性も含めて、幅をもって見るべきものである。

考察の対象とする感染症対策としては、まず一律に経済活動を制限する都市封鎖を対象にする。つぎに、一律ではなく、特定層に的をしばった対策がどの程度、費用対効果を高めるかを検討する。ここで検討する政策は、検査によって感染者の隔離を目指す対策、リスクの高い層を保護する対策、産業別に制限を課す政策である。費用が大きく異なる対策を比較する場合は、効果と費用の定量化の不確かさがあっても、ある程度頑健な結果が得られてきている。それは、一律に経済活動を制限して感染抑制を図る手段よりも、効果のある対象にしばって制限を加える手段が望ましい、ということである。本稿は以下のような構成のなかで、このことを示していく。

まず、2節では、感染症の流行を記述するが、経済活動を明示していない SIR モデルを示

² SIR モデル等に対策の便益と費用を導入して、動学的最適化問題を考える分析枠組みは、新型コロナウイルス感染症の流行以前に、Gersovitz and Hammer (2004)を始めとした研究がある。

し、経済活動と関係づける経路を与える。3節では、対策の厚生分析に必要な分析枠組みを説明する。4節では、感染症を明示していない、マクロ経済モデルから出発し、経済活動と感染症と関係づける経路を定式化し、健康と経済がトレードオフの関係にあるモデルを定式化する。そして、感染症対策がそのようなモデルの動学的最適化問題として感染症対策が構成できる例として、都市封鎖を取り上げる。5節は、最適化問題の解としての都市封鎖の性質を議論する。また、都市封鎖に関係するシミュレーション結果をいくつか紹介する。

6節と7節は、特定層を対象とする選択的な感染症対策を検討する。6節では、検査による隔離を検討する。この中でも一律検査と、対象をしぼった検査の手段として積極的疫学調査がある。都市封鎖よりも一律検査が効率的であり、一律検査よりも積極的疫学調査が効率的である。7節では、検査を行わずに観察できる属性によって活動制限を課す対策を検討する。このような対策を表現するために、社会が異質な個人から構成されることを記述できる多次元 SIR モデルを用いる。ここで取り上げる手段は、リスクの高い高齢者を隔離して、若年者の行動を制限しない対策と、産業別にリスクを考慮して異なった活動制限を課す対策である。

なお、本稿では、以上の多様な対策をできるだけ包括的に論じることのできるモデルを提示する。表1は、本稿のモデル分析で用いられる記号の一覧である。

表1 記号一覧

B	感染率を示す行列
C	接触回数
c	一律検査の限界費用
F	それまでにワクチンが開発されている確率
H	ハミルトン関数
I	感染者、単位行列
\tilde{I}	隔離された者
L	就業者
LE	平均余命
N	人口（初期値を1に基準化）、生存確率
$New(\cdot)$	新規感染者関数
P	GDP デフレーター
p	接触回数のうち感染する割合
R	累積回復者（初期値は0）
\mathcal{R}	実効再生産数
\mathcal{R}_0	基本再生産数
S	未感染者（感受性人口、初期値は1）

s	感染者が就業できなくなる割合
t	時点
U	求人
u	各時点の効用
V	社会的厚生（個人の効用の和）、求職
VSL	統計的生命価値
w	名目賃金
Y	1人当たり所得（消費）
Y_k	k 産業の生産
y	都市封鎖の程度（GDP ギャップ）
\bar{Y}	1人当たり潜在 GDP
β	感染率
γ	感染期間の逆数（感染者の回復率）
θ	積極的疫学調査の対象に陽性者が多く含まれる割合、産業の就業者の変化に対する GDP の変化率と基本再生産数の変化幅の比
ι	隔離された陽性者の割合
λ	共役変数
μ	死亡率
ν	ワクチンが開発される確率
ϕ	致死率
ρ	割引率
τ	検査の頻度

2. 感染症流行のモデル

2.1 SIR モデル

経済には、非感染者（感受性人口） S 、感染者（感染性人口） I 、感染症からの回復者・死亡者 R がいる。感染症による人的被害として死亡者を考慮する必要があるため、死亡者を考慮する SIRD モデルを用いるが、より通用している SIR モデルとの差は大きくないので、便宜上、SIR モデルに近い記述をして、SIR モデルと呼ぶことにする。当初（時点 0）の人口を 1 に基準化すると、

$$S(0) + I(0) = 1$$

$$R(0) = 0$$

として表される。時点 0 の直前まで感染者はおらず、時点 0 でごく少数の感染者が発生して、感染症流行が始まる。 t 時点の人口の流入はないものとする、

$$S(t) + I(t) + R(t) = 1 \quad (1)$$

となる。また、累積感染者は $1 - S$ であり、人口を N とすると、累積死亡者は $1 - N$ となる。

新規感染者（非感染者の減少）は、非感染者が感染者と接触することによって発生し、

$$-\dot{S}(t) = \text{New}(t) = S(t)C(t)p(t)\frac{I(t)}{N(t)} \quad (2)$$

と表されるとする。ここで、 C は 1 人が各時点に接触する人数（接触率、contact rate）、 p は接触者が感染する割合（二次発病率、secondary attack rate）、 I/N は接触者のうちの感染者の割合である。Begon et al. (2002) は、接触率について、人口密度に比例する（面積一定として $C \propto N$ ）「密度依存」（density-dependent）³ と、他の変数と無関係の定数である「頻度依存」（frequency-dependent）の 2 つの定式化を対比させている。密度依存接触の場合の新規感染者の発生は、

$$\text{New}(t) = \beta(t)S(t)I(t) \quad (3)$$

となり、頻度依存接触の場合は、

$$\text{New}(t) = \beta(t)S(t)\frac{I(t)}{N(t)} \quad (4)$$

と表される。ここで、 β を感染率（または伝播率、transmission rate）と呼ぶ。密度依存接触では、人口密度が 2 倍になると新規感染者の発生は 4 倍になる（2 次同次）が、頻度依存接触では人口が 2 倍になっても新規感染者の発生は 2 倍である（1 次同次）。

新規発生者のモデル化は、経済学のサーチ理論でのマッチング関数と類似性がある⁴。労働市場での求職（ U ）と求人（ V ）のマッチング関数が、 $U^{\alpha_1}V^{\alpha_2}$ で表されるとき、 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$

³ 面積当たり人口に比例するという意味で「密度依存」と呼ばれる。一定の体積での気体運動では、このような関係がある。

⁴ Garibaldi, Moen and Pissarides (2020) は、サーチ理論と SIR モデルの関連を解説している。Petrongo and Pissarides (2001) は、マッチング関数の研究を展望している。

となる二次マッチング (quadratic matching) は、密度依存接触と同じ 2 次同次となる。 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ となるマッチングは、頻度依存接触と同じ 1 次同次で、規模の経済が働かない。

以下では、(3)式に基づいて定式化するが、これは密度依存接触を考えているか、あるいは動学を単純化するために、(4)式での (死亡による) 人口の変化は無視できるものと考えているかのどちらかである。

感染者は、 γ の確率で回復または死亡すると仮定すると、感染者の変化は、

$$\dot{I}(t) = New(t) - \gamma I(t) \quad (5)$$

となる。感染者が感染性を有する平均期間 (感染性期間、infectious period) は、 $1/\gamma$ である。

1 人の感染者が感染性期間に何人に感染させるか、を示す実効再生産数 \mathcal{R} を、

$$\mathcal{R}(t) \equiv \frac{1}{\gamma} \frac{New(t)}{I(t)}$$

と定義する。これを(5)式に代入して変形すると、

$$\dot{I}(t) = (\mathcal{R}(t) - 1)\gamma I(t)$$

となり、実効再生産数が 1 より大きければ流行は拡大し、1 より小さければ流行は収束する。

単純な SIR モデルでは、感染率 β は一定であると仮定することが多い。これを民間も政府も何も感染症対策をとらないときの感染率 β_0 とし、感染前の状態で未感染者が人口に等しいとしたときの実効再生産数が基本再生産数 $\mathcal{R}_0 \equiv \beta_0/\gamma$ と呼ばれる。このときの感染者の変化は、

$$\dot{I}(t) = (\mathcal{R}_0 S(t) - 1)\gamma I(t) \quad (6)$$

となる。

新規死亡者は、

$$-\dot{N}(t) = \phi(I(t))\gamma I(t) \quad (7)$$

のように人口の減少で示される。医療資源の制約から、死亡率 ϕ は患者数が多い時期には上昇する ($\phi' > 0$) と想定する。

2.2 実効再生産数の変動要因

実効再生産数は時間とともに減少する。まず、感染率が一定であっても、感染が広がると、(6)式が示すように、未感染者が減ることで、実効再生産数が低下していく。これは、感染者の周りに免疫をもった人 (モデルでの回復者) が増えると、新たに感染する人の割合が減るからである。感染者の割合が (固定された) 基本再生産数の逆数よりも大きくなると、感染は収束に向かう。これは、集団免疫の形成である。

感染率が以下の要因で低下することによっても、実効再生産数は低下していく。

感染リスクに個人差があると、平均的な感染速度が下がっていくことで、実効再生産数は低下していく。これは、最初に感染しやすい人が多く感染して、感染リスクの低い人が未感染者に多く残ることで、未感染者の平均的な感染速度が下がるためである。集団免疫の成立

はこの下がった感染率をもとに決定されるので、基本再生産数が維持されると仮定した予測よりも早く集団免疫は形成される。

リスク格差は社会の構造にも依存しており、社会科学では異質性は本質的な問題として考慮する必要がある。経済学者が新型コロナウイルス感染症の代表的な予測モデルを展望した Avery et al. (2020)は、異質性に注目した節を設けている。また、Ellison (2020)は、異質性をもつ SIR モデルについての議論を展望している。

未感染者の減少と異質性は、行動変容がなくても実効再生産数が減少するメカニズムであるが、民間の経済主体と政府が感染症対策をとることでも実効再生産数が低下する。まず、個人や企業が自発的に予防措置をとることが考えられる。つぎに、政府が自発的予防以上の行動変容を促したり、より強力な措置として行動制限（自粛要請、都市封鎖など）を課したりすることがある⁵。

比較的費用のかからない行動変容は永続するかもしれないが、多くは経済的・心理的費用をとまうので、行動変容や行動制限は一時的な感染症対策であって、長く持続できないところが他の要因と異なるところである。したがって、感染症対策の多くは、集団免疫を得るか否かには影響しない。ウイルスを根絶できなければ、政策による行動変容の多くは、一時的に感染速度を遅らせて「時間を稼ぐ」ために用いられる。時間を稼ぐことの便益については、後述する。

その他に、実効再生産数が変化する可能性に、感染症の季節性がある。コロナウイルスによる風邪は、インフルエンザほどではないが冬に流行し、夏に沈静化する季節性がある。また、感染者の免疫も永続しない。Kissler et al. (2020)による、夏に基本再生産数が低下すると想定したシミュレーションでは、米国では新型コロナウイルス感染症の流行の波が何回か冬に訪れることが示されている。ただし、新型コロナウイルス感染症の季節性はまだ確認されていない。

⁵ Avery et al. (2020)は、SIR モデルでの行動と感染の関係づけを、経済学での構造型アプローチと誘導型アプローチの区別を使って、整理している。構造型は、感染のメカニズムを詳細に記述することを指向するモデルであり、政策が影響するメカニズムを記述することによって政策の分析を可能にする。誘導型は、流行の予測をする際にモデルを特定化する制約をあまり置かずに流行を記述しようとする (Atkeson, Kopeccky and Zha 2020、Fernandez-Villaverde and Jones 2020 等)。モデルが使用される目的に応じて、構造型と誘導型の長所がある。

3. 厚生評価の枠組み

3.1 政府介入の根拠

公衆衛生的介入の評価を考える上では、経済主体も自主的に感染予防をとることを考慮に入れなければいけない。かりに社会的厚生関数を最大化する問題を解いたとしても、それは民間と政府を合わせた対策を考えていることになる。代表的個人のインセンティブに社会的便益と社会的費用が正しく反映されていれば、民間の予防行動以上に公衆衛生的対策を付け加える必要はない。したがって、公衆衛生的介入が必要であれば、経済主体の私的便益と社会的便益の乖離が生じている。経済主体が合理的な場合は、この乖離が生じる理由には、(1)感染予防における外部性を考慮しないことと、(2)医療資源制約によって感染者が増加すると致死率が増加することの2つがある。

感染の外部性については、(3)式のような密度接触感染では、例えば個人が外出を y の割合だけ自粛すると、他者の行動を所与として接触回数は $(1-y)C$ に減少する。しかし、全員が yy の割合だけが外出を自粛すると、外出したときの接触回数が $1-y$ の割合だけ減少するので、感染機会は合わせて $(1-y)^2$ の減少が見込める。自粛の社会的限界便益は、私的限界便益の2倍になる⁶。また、(7)式で示されるような、致死率が感染者の増加関数であることを民間の経済主体が考慮しないと、民間の対策は過小になる。これは、医療資源制約による外部性と考えることができる。

経済主体が合理的でない場合は、政府が民間主体の行動バイアスを是正することがある。例えば、未知の感染症に対しては事前に十分な知識をもたないことから、政府が適切な情報を与えることには効果があると考えられる。また、ナッジによって民間主体の予防行動を促すことも考えられる。

外部性を解決する手段には、直接規制とピグー税・補助金がある。例えば、大規模な集会を制限することは感染症対策の常套手段であり、日本では大規模なイベントの自粛が、事業者への営業自粛の要請としては最も早い段階（2020年2月26日）に出された。ここで生じる外部性は、集団感染の費用を事業者が負うことなく営業することである。このため、事業者の私的便益と社会的便益に乖離が生じる。ピグー税・補助金の手段を選択するならば、事業者が興行を中止することに対し補償を与えるのか、営業することに対して罰金を科すのか、の選択肢がある。コースの定理の観点から考えると、事業者に感染拡大のリスクがありながら営業する権利を最初に認めているならば、営業自粛に対して補償し、そうした営業をする権利が最初に認められていなければ、営業に対して罰金を科すことで、補償と罰金が適切な水準であれば（取引費用がなければ）、いずれにしても効率的な資源配分が達成され

⁶ Farboodi, Jarosch and Shimer (2020)、Garibaldi, Moen and Pissarides (2020)等で議論されている。他に、Gonzalez-Eiras and Niepelt (2020b)は、個人の行動が総感染者等の状態変数に影響を与えないという動学的外部性の存在を指摘している。

る。

しかし、初期の権利配分に応じて、事業者が得る所得は異なるので、自粛が長期間にわたる場合には、補償がないと事業継続が困難になり、さらに事態が悪化すると事業資産が清算されることの厚生損失が発生する。

このように権利の配分が感染症対策のあり方に重要な影響をもつので、権利関係は事前に明確にして、事業活動の予見可能性を高めることが円滑な経済活動の運営に不可欠である。感染症が流行してから、経済活動制限にともなう補償をすべきかどうか、を議論するのは、財産権の確立という経済発展の基盤を揺るがすものになり、経済活動制限の影響以上に、経済活動に悪影響を与えるものになる。

3.2 公衆衛生的介入の手段

公衆衛生的介入の手段を費用の低い順に見ていくと、ナッジ (nudge)、社会的隔離 (social distancing)、検査による隔離 (testing and isolation)、都市封鎖 (lockdown) がある。理論分析ではナッジは、費用が無視できるほど小さい、という政策手段に分類され、研究の主眼は効果の確認にある。本稿の主眼は対策の費用と便益の考量にあるので、ナッジはくわしく取り上げない。社会的隔離は民間が自主的にとる部分も大きい、政府による強制手段もあり得る。外出は自由である社会的隔離と外出の自由が制限される都市封鎖は実生活での違いは大きい、行動を制限して感染機会を減らすことを抽象的に表現したモデルでは区別されにくい。実際、モデルの構造は同じであるが、論文によって社会的隔離と呼ばれたり、都市封鎖と呼ばれたりしている。費用の多寡で社会的隔離と都市封鎖がおおまかに区別されているとみなされる。

都市封鎖が(社会の活動に不可欠な労働者以外に)一律の行動制限を課す手段であるのに対し、検査による隔離は対象を限定した行動制限を課す手段である。制限を課される経済主体が非常に小さくなることから、行動制限による経済損失は都市封鎖よりも桁違いに小さい。考慮すべきは、追跡・検査費用が必要なことと、対象を限定することでどれだけ効果が弱まるかである。この問題は、6節以降で検討される。

3.3 統計的生命価値

感染症対策では、人的被害と経済的被害のトレードオフが中心的な問題になる。そこで、人的被害を貨幣価値化する概念である統計的生命価値 (VSL; value of a statistical life) の概念が重要になる。

この小節だけ N を各時点の生存確率とし、代表的個人の生涯効用を

$$\lambda_N(0) \equiv \int_0^{\infty} e^{-\rho t} N(t) u(Y(t)) dt$$

とする。 Y は消費、 ρ は割引率であり、 $N(0) = 1$ とする。死亡率を

$$\mu(t) \equiv -\frac{\dot{N}(t)}{N(t)}$$

と定義すると、

$$N(t) = N(0)e^{-\int_0^t \mu(t)dt}$$

となるので、生涯効用は、

$$\lambda_N(0) = N(0) \int_0^\infty e^{-\rho t} e^{-\int_0^t \mu(t)dt} u(Y(t)) dt \quad (8)$$

と表すことができる。初期時点のわずかの生存確率の上昇に対する支払意思額（初期時点の消費財をどれだけ犠牲にしてもよいか）が、Shelling (1968)によって概念化された統計的生命価値になる。 N と Y の変化による効用の変化は

$$d\lambda_N(0) = \lambda_N(0)dN(0) + u'(Y(0))dY(0)$$

となり、統計的生命価値は、

$$-\left. \frac{dY(0)}{dN(0)} \right|_{d\lambda_N(0)=0} = \frac{\lambda_N(0)}{u'(Y(0))} \quad (9)$$

のように、生涯効用を初期時点の消費の限界効用を用いて貨幣価値化したものである⁷。

(9)式で消費が一定であるという制約を置くと、

$$\frac{u(Y)}{u'(Y)} \int_0^\infty e^{-\rho t} N(t) dt \equiv \frac{u(Y)}{u'(Y)} LE(\rho) \quad (10)$$

となり、より操作可能な関係式を求められる。 $LE(\rho)$ は割り引いた平均余命となる。

統計的生命価値は、補償賃金の考え方に沿って死亡リスクと賃金の業種間格差の関係から推計したり、仮想評価法によって死亡リスクを下げる措置に対する支払意思額を尋ねることで推計されている。これらの研究による推計値は、安全に関する規制や政策の評価に実際に使用されており、新型コロナウイルス感染症対策としての都市封鎖の評価を行った Glover et al. (2020)、Gollier and Straub (2020)、Scherbina (2020)でもこれに沿った推計値が用いられている。しかし、Hall, Jones and Klenow (2020)、Pindyck (2020)は、新型コロナウイルス感染症による死亡リスクは、従来の統計的生命価値が想定するリスクよりもけた違いに大きいため、従来の推計値を用いることは過大評価になると指摘している。

生存確率の（小さいが）有限の変化に対する支払意思額を(10)式に即して考えると、平均余命を δ の割合だけ延ばすことの効用の増加と釣り合う初期時点の消費の減少分 α となる。つまり、

$$u(Y) - u(Y - \alpha) = u(Y)(1 + \delta)LE(\rho) - u(Y)LE(\rho) \quad (11)$$

を満たす α である。左辺をテーラー展開によって線形近似すると、

$$u'(Y)\alpha = u(Y)\delta LE(\rho)$$

⁷ 初期時点の生存確率を1とした場合、増加する方向への変化は考えにくいので、経済学的には生存確率が1よりわずかに減少する変化を考えていると解釈する。

となり、(9)式に沿った統計的生命価値が求められる。しかし、 δ が大きくなると、テラー展開による近似の誤差は大きくなる。

Hall, Jones and Klenow (2020)は、米国での統計的生命価値の典型例として、1年間の平均余命を6年間の消費の価値とした、環境保護庁(EPA)の設定値を紹介している。新型コロナウイルス感染症による致死率(死亡者/人口)として、0.81%(Ferguson et al. 2020に基づく)と0.44%(インディアナ州の抗体調査結果に基づく)の2つを想定する。死亡者は高齢者に偏るので、死亡者の平均余命は14.5年と計算され、死亡者の統計的生命価値は87年分の消費と計算される。すると、致死率0.81%を避ける(感染症をなくす)ことには、1年間の消費の70.5%($0.81\% \times 14.5 \times 6$)の価値があると計算される。

これに対して、(11)式に基づき、効用関数を特定化して試算すると、1年間の消費の41.3%となった。このことから、線形近似によって、統計的生命価値を70%も過大評価することがわかる。なお、効用関数の特定化次第で、この比率は変わってくる。また、この試算では、1年間の平均余命の延長は、3.5年分の消費の価値がある。

最適な都市封鎖の時期と規模を研究した Alvarez, Argente and Lippi (2020)では、Hall, Jones and Klenow (2020)の試算値に沿って、1年の平均余命の伸びが3年間の消費に相当すると設定した。死亡者の平均余命は10年としているため、死亡者の統計的生命価値はHall, Jones and Klenow (2020)の約3分の2になる。また、GDP比で表される経済活動の損失と比較できるように、消費のGDP比を3分の2として、GDP比に換算している。このため、死亡者の統計的生命価値は1人当たりGDPの20年分に相当すると設定された。また、統計的生命価値を1人当たりGDPの10年分、30年分、80年分、140年分に変えた感度分析も行っている。最後のGDPの140年分は、上述したEPAの設定値である消費の200年分にほぼ相当する。表2は、EPAの設定値、Hall, Jones and Klenow (2020)の試算値、Alvarez, Argente and Lippi (2020)の基準ケースの設定をまとめたものである。

表2 統計的生命価値

	1年間の余命の価値	死亡者の平均余命	統計的生命価値
EPA	消費の6年分	40年	消費の240年分
Hall, Jones and Klenow (2020)	消費の3.5年分	14.5年	消費の51年分
Alvarez, Argente and Lippi (2020)	消費の3年分	10年	消費の30年分 GDPの20年分

(注) 消費、GDPは1人当たり。

新型コロナウイルス感染症によるリスクの大きさは、従来の統計的生命価値の推計が対象としていたリスクよりも桁違いに大きく、既存の設定値が過大となることは理論的にわかるものの、人々の実際の選択から妥当な推計値を得ることは困難であり、研究の蓄積も少

ない。したがって、特定の値にしぼって、望ましい政策を示すのではなく、統計的生命価値に幅をもたせた推計をした情報を提供の方が望ましいかもしれない。Acemoglu et al. (2020)は、Alvarez, Argente and Lippi (2020)と類似の問題設定でシミュレーションを行っているが、人的被害と経済的被害を別次元の尺度として、そのトレードオフを示す形で、結果を提示している。

4. 感染症のマクロ経済学

4.1 感染前経済

感染症流行前は、全員が未感染者で、経済は潜在 GDP (1人当たり \bar{Y}) の水準にあったでしょう。感染症の流行は短期間に生じるので、モデルでは投資は考慮せず、所得と消費は等しいものとする。効用は消費から得られるが、ここでは所得の関数と表現することにする。そのときの社会全体の効用は、

$$V_0 \equiv \int_0^{\infty} e^{-\rho t} N_0 u(\bar{Y}) dt = \frac{N_0 u(\bar{Y})}{\rho}$$

となる。感染前経済では誰も死亡せずに、人口は一定 ($N_0 = 1$) であると仮定する。

4.2 感染症対策をしない経済

つぎに、感染症の対策を何もしない経済を考える。実際には、政府の対策がなくても人々が自衛のために感染予防をするので、何も対策をしないときの感染率 β_0 が感染症流行後も維持されるとする SIR モデルによって感染の流行を予測することは、経済学の考え方からすればあり得ない。このような想定は、感染症対策の効果を分析するための反実仮想 (counterfactual) として用いられるものである。つまり、感染症の被害想定を推計するために用いられる。

感染症の被害は、死亡者が出ることの人的被害と感染者の健康が悪化することで就業できなくなる経済的被害がある。感染者の一定割合 s が就業できなくなり、その割合で生産が低下すると想定しよう。保険または所得再分配政策によって、就業の損失が全体で均等に負担されていると想定すると、社会全体の効用は、

$$\int_0^{\infty} e^{-\rho t} N_0 u((1 - sI(t))\bar{Y}) dt$$

と表される。ここでの休業は、感染予防のための休業ではなく、健康が悪化したことで働けなかった休業である。感染予防のための行動をとらない、という前提なので、症状の軽い者は就業することになる。実際にどの程度の生産の低下が起こるかを正確に測定することは難しい。また、感染症の被害の規模としては死亡者が出ることの被害の方が大きいと考えられ、感染症対策の分析でも、感染者の休業による生産の低下は捨象することがある⁸。

また、就業状態にかかわらず、健康状態の悪化にともなう「生活の質」(quality of life) の低下も効用の低下要因となるが、これも死亡者が出ることの被害よりもはるかに小さく、推計が困難であるため、考慮に入れていない研究が多い。なお、重症から回復した者が後遺症で予後の生活の質が低下する被害については、現時点では情報が乏しいため、推計が困難であるが、大きな損失となるのであれば考慮する必要があるだろう。

⁸ 例えば、Alvarez, Argente and Lippi (2020)。

4.3 目的関数

ワクチンが開発されない場合、社会全体の効用を

$$\int_0^{\infty} e^{-\rho t} N(t) u(Y(t)) dt$$

で表す。

N は、統計的生命価値で用いた生存確率ではなく、各時点の人口を表す。これは、各時点で個人の効用を集計したものを各時点の社会の効用とし、つぎに時間を通して各時点の社会の効用を集計していると解釈できる。

4.4 ワクチンの価値

感染症対策の効果を評価する際に、ワクチンの効果が重要になってくる。 t 時点でワクチンが開発されると、そこで感染症の流行は終わり、感染前経済に復帰すると仮定すると、社会全体の効用は、

$$\int_0^t e^{-\rho s} N(s) u(Y(s)) ds + \int_t^{\infty} e^{-\rho s} N(t) u(\bar{Y}) ds \quad (12)$$

となる。(12)式の第1項は t 時点まで感染症が流行するときの効用で、第2項は感染前経済になって以降の効用である。

ワクチンがいつ開発されるかは事前にはわからないので、ワクチンが確率的に到来すると考えよう。ワクチンの開発が各時点で ν の確率で起こるポアソン過程に従うと、 t 時点までにワクチンが開発されている確率は、

$$F(t) = 1 - e^{-\nu t}$$

であり、 t 時点でワクチンが開発される確率は、

$$\dot{F}(t) = \nu e^{-\nu t} = \nu(1 - F(t))$$

である。期待効用は、

$$\begin{aligned} V(0) &= \int_0^{\infty} \dot{F}(t) \left[\int_0^t e^{-\rho s} N(s) u(Y(s)) ds + \int_t^{\infty} e^{-\rho s} N(t) u(\bar{Y}) ds \right] dt \\ &= \int_0^{\infty} e^{-(\rho+\nu)t} N(t) u(Y(t)) dt + \int_0^{\infty} e^{-\rho t} N(0) u(\bar{Y}) ds - \int_0^{\infty} e^{-(\rho+\nu)t} N(t) u(\bar{Y}) dt \\ &\quad + \int_0^{\infty} \left[\dot{N}(t) e^{-\nu t} \int_t^{\infty} e^{-\rho s} u(\bar{Y}) ds \right] dt \\ &= V_0 - \int_0^{\infty} e^{-(\rho+\nu)t} N(t) [u(\bar{Y}) - u(Y(t))] dt \\ &\quad - \int_0^{\infty} \left[e^{-(\rho+\nu)t} (-\dot{N}(t)) \int_t^{\infty} e^{-\rho(s-t)} u(\bar{Y}) ds \right] dt \end{aligned} \quad (13)$$

と表される⁹。ここで、

$$Y(t) = (1 - y(t))\bar{Y} \quad (14)$$

とする。(14)式を変形すると、

$$-y(t) = \frac{Y(t) - \bar{Y}}{\bar{Y}}$$

となり、 y はGDPギャップの符号を逆転させたものになる。

(13)式を変形して、(7)式を用いて、感染前経済からの厚生損失に書き換えると、

$$V_0 - V(0) = \int_0^\infty e^{-(\rho+\nu)t} \left\{ N(t) \left[u(\bar{Y}) - u\left((1 - y(t))\bar{Y}\right) \right] + \phi(I(t))\gamma I(t)\lambda_{N,0} \right\} dt \quad (15)$$

と表される。ここで、感染前経済での t 時点以降の効用を

$$\lambda_{N,0} \equiv \int_t^\infty e^{-\rho(s-t)} u(\bar{Y}) ds$$

と定義している。厚生損失は、各時点で感染症対策をとることの生産の低下による損失と、各時点の死亡者の効用の損失の2つからなることがわかる。

⁹ (13)式のワクチン開発前の効用は部分積分により、

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \dot{F}(t) \int_0^t e^{-\rho s} N(s) u(Y(s)) ds dt \\ &= \left[-(1 - F(t)) \int_0^t e^{-\rho s} N(s) u(Y(s)) ds \right]_0^\infty \\ & \quad - \int_0^\infty [-(1 - F(t)) e^{-\rho t} N(t) u(Y(t))] dt = \int_0^\infty e^{-(\rho+\nu)t} N(t) u(Y(t)) dt \end{aligned}$$

と変形し、ワクチン開発後の効用は部分積分により、

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \dot{F}(t) \int_t^\infty e^{-\rho s} N(t) u(\bar{Y}) ds dt \\ &= \left[-(1 - F(t)) \int_t^\infty e^{-\rho s} N(t) u(\bar{Y}) ds \right]_0^\infty + \int_0^\infty [-(1 - F(t)) e^{-\rho t} N(t) u(\bar{Y})] dt \\ & \quad - \int_0^\infty \left[-(1 - F(t)) \dot{N}(t) \int_t^\infty e^{-\rho s} u(\bar{Y}) ds \right] dt \\ &= \int_0^\infty e^{-\rho s} N(0) u(\bar{Y}) ds - \int_0^\infty e^{-(\rho+\nu)t} N(t) u(\bar{Y}) dt \\ & \quad + \int_0^\infty \left[\dot{N}(t) e^{-\nu t} \int_t^\infty e^{-\rho s} u(\bar{Y}) ds \right] dt \end{aligned}$$

と変形している。

5. 都市封鎖

5.1 貨幣価値化された厚生損失

費用便益分析の枠組みに乗せるために、(15)式を貨幣価値化した厚生損失を考える。まず、(15)式右辺にある各時点での効用を1人当たり潜在GDP水準でテラー展開すると、

$$u\left((1-y(t))\bar{Y}\right) = u(\bar{Y}) + u'(\bar{Y})\left((1-y(t))\bar{Y} - \bar{Y}\right)$$

となり、潜在GDP水準からの厚生損失は、

$$u(\bar{Y}) - u\left((1-y(t))\bar{Y}\right) = u'(\bar{Y})y(t)\bar{Y} \quad (16)$$

と表される。また、感染前経済で計測された統計的生命価値 VSL は、

$$VSL \equiv \frac{\lambda_{N,0}}{u'(\bar{Y})} \quad (17)$$

であり、貨幣価値化された厚生損失は、(16)式と(17)式を(15)式に代入して、変形すると、

$$\frac{V_0 - V(0)}{u'(\bar{Y})} = \int_0^{\infty} e^{-(\rho+\nu)t} [N(t)y(t)\bar{Y} + \phi(I(t))\gamma I(t)VSL] dt$$

となる。右辺括弧内の第1項が経済的損失であり、GDPギャップで表され、第2項が人的損失であり、死亡者の統計的生命価値である。

望ましい感染症対策を求めることは、貨幣価値化された厚生損失を最小化する問題であり、

$$\min_{y(t)} \int_0^{\infty} e^{-(\rho+\nu)t} [N(t)y(t)\bar{Y} + \phi(I(t))\gamma I(t)VSL] dt \quad (18)$$

と表現される。(1)式を用いて(3)式から S を消去し、(5)式を

$$\dot{I}(t) = New(1-y(t), I(t), R(t)) - \gamma I(t) \quad (19)$$

と変形する。(19)式での新規感染者の発生に y が影響するのは、感染率は接触率の増加関数であり、接触率は経済活動の増加関数であると考えているからである。こうして経済活動と感染拡大が関係をもち、目的関数では経済活動と感染症による人的被害の両方が含まれる。このようにして、健康と経済のトレードオフがモデル化される。また、回復者・死亡者の動学は、

$$\dot{R}(t) = \gamma I(t) \quad (20)$$

となり、人口の動学は(7)式より、

$$\dot{N}(t) = -\phi(I(t))\gamma I(t) \quad (21)$$

と表される。

望ましい感染症対策は、3つの状態変数に関する動学方程式(19)、(20)、(21)式を制約にして、(18)式の最小化問題を解くことで求められる。この動学的最適化問題を解くために、ハミルトン関数を

$$\begin{aligned}
H^*(t) &= e^{-(\rho+\nu)t}H(t) \\
&= e^{-(\rho+\nu)t}\{N(t)y(t)\bar{Y} + \phi(I(t))\gamma I(t)VSL \\
&\quad + \lambda_I(t)[New(1-y(t), I(t), R(t)) - \gamma I(t)] + \lambda_R(t)\gamma I(t) \\
&\quad + \lambda_N(t)[- \phi(I(t))\gamma I(t)]\}
\end{aligned}$$

と定義する。共役変数 λ_I 、 λ_R 、 λ_N は、それぞれの状態変数に対するラグランジュ乗数である。

感染症対策による経済活動制限が内点解をもつと仮定すると、最適化の条件は、

$$\frac{\partial H(t)}{\partial y(t)} = N(t)\bar{Y} - \lambda_I(t)\frac{\partial New(t)}{\partial(1-y(t))} = 0 \quad (22)$$

となる¹⁰。共役変数の動学は、

$$\begin{aligned}
\dot{\lambda}_I(t) - (\rho + \nu)\lambda_I(t) &= -\frac{\partial H(t)}{\partial I(t)} = -\phi(I(t))\gamma VSL - \phi'(I(t))\gamma I(t)VSL \\
&\quad - \lambda_I(t)\frac{\partial New(t)}{\partial I(t)} + \lambda_I(t)\gamma - \lambda_R(t)\gamma + \lambda_N(t)\phi(I(t))\gamma + \lambda_N\phi'(I(t))\gamma I(t)
\end{aligned} \quad (23)$$

$$\dot{\lambda}_R(t) - (\rho + \nu)\lambda_R(t) = -\frac{\partial H(t)}{\partial R(t)} = -\lambda_I(t)\frac{\partial New(t)}{\partial R(t)} \quad (24)$$

$$\dot{\lambda}_N(t) - (\rho + \nu)\lambda_N(t) = -\frac{\partial H(t)}{\partial N(t)} = -y(t)\bar{Y} \quad (25)$$

で表される。

3節で説明したように、ここで考えられている感染症対策は、民間の自粛と公衆衛生的介入を合わせたものである。都市封鎖の目標は民間の自粛と合わせての経済活動の制限であり、都市封鎖を考えるとときでも、この形での経済活動の制限に着目して、社会がどこを目指せばよいかを知ることが有益である。本稿でも、そのような観点から考察を進める。公衆衛生的介入が経済活動を制限する部分を知るには、政府が介入しないときの民間の動学的最適化問題を解いて、民間の自粛による経済活動の抑制を求め、社会全体での経済活動の抑制との差をとる作業をするが、民間の最適化行動を具体的にモデル化しない本稿では、この議論には立ち入らない。

感染症対策についての最適化条件は、限界費用と限界便益が等しくなるところで感染症対策が選択される、と解釈される。限界費用は所得の減少であり、限界便益は、感染者の減少への貢献と感染者の経済厚生への影響の積で表されている。この感染者の経済厚生への影響は、死者による統計的生命価値の減少分が中心的な部分と考えられるが、他の項もあり、その影響は複雑である。

¹⁰ Rowthorn and Toxvaerd (2020), Toxvaerd (2020)は、端点解となるモデルを分析している。

5.2 感染症対策の便益と費用

ここでの最適化条件の意味を考察しよう。(22)式を変形した、

$$\lambda_I(t) \frac{\partial New(t)}{\partial (1-y(t))} = N(t)\bar{Y} \quad (26)$$

は、経済活動を抑制することの限界便益（左辺）と限界費用（右辺）が均衡することを示している。費用は、GDPギャップが低下することによるGDPの低下である。便益は、活動の低下が感染者を減らす効果（ $\partial New(t)/\partial (1-y(t))$ ）に、感染者低下が厚生損失を減らす効果（ $\lambda_I(t)$ ）を乗じたものである。 λ_I を逆の方向から解釈すると、感染者による厚生損失を表すものであるが、ここでは感染者が生産活動に従事できないことの所得の低下は捨象しているので、死亡による統計的生命価値の損失を表している。

(23)式、(24)式、(25)式を前向きに解くと、

$$\lambda_I(t) = \int_t^{\infty} e^{-(\rho+\nu+\gamma)(s-t)} \left[(VSL - \lambda_N(s)) (\phi(I(t))\gamma + \phi'(I(t))\gamma I(t)) + \lambda_I(s) \frac{\partial New(s)}{\partial I(s)} + \lambda_R(s)\gamma \right] ds \quad (27)$$

$$\lambda_R(t) = \int_t^{\infty} e^{-(\rho+\nu)(s-t)} \lambda_I(s) \frac{\partial New(s)}{\partial R(s)} ds$$

$$\lambda_N(t) = \int_t^{\infty} e^{-(\rho+\nu)(s-t)} \gamma(s)\bar{Y} ds$$

が得られる。ただし、(27)式の右辺に λ_I が残っているので、 λ_I について完全に解けているわけではない。(27)式の意味を考えてみよう。死亡者の増加は感染者の増加によって生じるが、感染者の増加は感染モデルによって予測される将来の感染者の増加も含む必要がある。死亡者は、新規感染者のなかの死亡者だけではなく、新規感染者が感染させた感染者からの死亡者を含み（右辺第2項に相当）、さらに感染者が回復し免疫をもつことで感染者が減る効果（右辺第3項に相当）も加味して考える必要がある。

便益を評価するには、死亡者の統計的生命価値、新規感染者から発生する死亡者（2次以降の感染者や回復者の効果も含む）を知るための感染者予測と致死率、経済活動と感染率の関係、の3つを知る必要がある。

最後の経済活動と感染率の関係は、感染率と接触機会に関する疫学の研究と、接触率と二次発病率の関係を結びつけることで行われる。Ferguson et al. (2006)は、米国でのインフルエンザウイルス感染が、30%は家庭内、37%は学校と職場、33%は地域で起こると想定していた。この想定は、Ferguson et al. (2020)の新型コロナウイルス感染症の流行シミュレーションにも利用された。接触機会を場面ごとに分解することは、(2)式を例えば、

$$New(t) = S(t) [C^{home}(t)p^{home}(t) + C^{school}(t)p^{school}(t) + C^{work}(t)p^{work}(t) + C^{others}(t)p^{others}(t)] \frac{I(t)}{N(t)}$$

のように、家庭内 (home)、学校 (school)、職場 (work)、地域 (others) に区別して接触回数と感染確率を設定して表現することができる。経済学の分析では、この想定を踏襲しながら、感染機会の一部が経済活動に関係すると想定している。定式化の1つは、

$$New(t) = \beta(t)S(t)I(t) = \beta_0 \left[(1 - \alpha) + \alpha(1 - y(t))^2 \right] S(t)I(t) \quad (28)$$

のように感染率が経済活動水準の2次関数で表されるものであり、Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a, b)、Jones, Philippon and Venkateswaran (2020)で使われている。

Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a, b)は、感染機会が家庭内、地域、学校・職場のそれぞれで1/3ずつとし、地域での接触の半分が消費と関係し、学校・職場での接触の半分が労働供給と関係していると設定した。家庭内の接触は増減しないと想定すると、消費と労働供給が比例関係にあり、経済活動の最大限の抑制で(経済活動全停止なので非現実的だが)接触機会を最大1/3削減できることになる。経済活動を y の割合だけ抑制すると、感染率は、

$$\beta(t) = \beta_0 \left[\frac{2}{3} + \frac{1}{3}(1 - y(t))^2 \right]$$

になるという関係が想定される。接触する者同士が活動を制限するので、抑制効果は自乗で働くと想定している。これは、密度依存接触を想定しているとも解釈できる。

一方、Jones, Philippon and Venkateswaran (2020)は、消費の抑制で地域の接触を最大ですべて、労働供給の抑制で学校・職場での接触を最大ですべて削減できると想定した。経済活動の抑制で家庭内の接触は変化しないと想定したので、経済活動の制限で接触機会を最大2/3削減できると想定したことになる。この場合の感染率は、

$$\beta(t) = \beta_0 \left[\frac{1}{3} + \frac{2}{3}(1 - y(t))^2 \right]$$

となる。

5.3 都市封鎖のタイミング

(26)式をもとに、都市封鎖のタイミングについて、考えてみよう。都市封鎖は経済活動の抑制のピーク時だと考えられる。まず、都市封鎖の限界費用は、人口が少ないほど小さくなるので、遅れるほど限界費用が低くなる。しかし、感染症による死亡者の全人口への影響はさほど小さくなく、限界便益が顕著に大きくなる時期があれば、限界費用によって時期を選ぶ要素はそれほど強くないと考えられる。一方、限界便益については、感染者の発生は(28)式から、

$$\frac{\partial New(t)}{\partial (1 - y(t))} = 2\beta_0 \alpha S(t)I(t)(1 - y(t))$$

となり、感染の発生が高い時期 ($S(t)I(t)$ が大きい時期) に、感染を抑制することの限界便益が大きいことがわかる。SIRモデルでは、感染者を抑制して、免疫を得た人口を増やすことで、長期的な感染者と死亡者を減らすことができる。都市封鎖は感染率を一定割合下げる

効果があるので、感染者が多く発生している時期のほうが、抑制される感染者数が大きくなり、この長期的効果が大きくなる。したがって、大きな費用がかかる都市封鎖は、ある程度感染者が増えた時期に「満を持して」実行することが望ましいことになる。

ただし、ワクチンの存在が早期実行の便益を生み出していて、感染流行ピークの手前で都市封鎖を実行することを望ましくさせる。目的関数では、各時点でワクチンが開発される確率 v を加えて将来を割り引くことで、早い時期に対策をとることの便益が増している。

ここでのモデルの前提となっている都市封鎖の効果は実際にあったかどうかは、また別の検証課題になり、包括的な展望は別の機会に譲る。効果の検証が困難となる理由は、いくつか存在する。対策は内生的に決定されるため、感染が流行した国ほど都市封鎖を取りやすい傾向が考えられるが、これは都市封鎖をすると流行が深刻であるという因果関係ではない。都市封鎖をする以前に、より費用のかからない自粛や社会的隔離対策をとっていると、都市封鎖の効果を分離しにくい、という問題がある。

5.4 その他の動学モデル

SIR モデルでの最適な感染症対策の動学は明示的に解くことができず、数値計算に頼らざるを得ないが、SIR モデルによる動学を近似できるようなモデルを用いて、動学を解析的に解くことも研究の方向性として考えられる。本稿で標準的な SIR モデルをそのまま用いるのではなく、感染症対策の効果を追跡しやすくするために、人口の変化を捨象した近似モデルを用いているのも、そうした方向性を加味したものである。より取り扱いやすい動学で近似するという観点からは、ロジスティック曲線やゴンペルツ曲線で感染症の流行を記述することも考えられる。Gonzalez-Eiras and Niepelt (2020)は、こうした方向性に沿って政策解を解析的に求めているが、目的関数と感染症流行の構造の合理性は犠牲になっており、普及するかどうかはわからない。

SIR モデルでは免疫は永続すると仮定されているが、新型コロナウイルスでは免疫は永続せず、再感染が起こる。したがって、感染後にまた感染の可能性のある未感染者に戻る SIS モデルが使われるべきかもしれない。行動変容のない SIS モデルでの感染者の動学は、ロジスティック曲線になる。このことは、ロジスティック曲線で感染の流行を記述する分析が必要とされる理由になる。また、感染者が永続的な免疫を獲得しないことから、上述の SIR モデルで観られた、感染者を抑制することの長期的効果がない。Giannitsarou, Kissler and Toxvaerd (2020)は、SIERS モデルで最初から対策をとることが望ましいことを示している。長期的には一定の新規感染者が持続する風土病 (endemic) となるので、長期均衡での感染症対策の分析も重要になってくる。

5.5 都市封鎖のシミュレーション分析

以下では、都市封鎖のシミュレーションの一例として、Alvarez, Argente and Lippi (2020)、Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a)、Jones, Philippon and Venkateswaran (2020)を

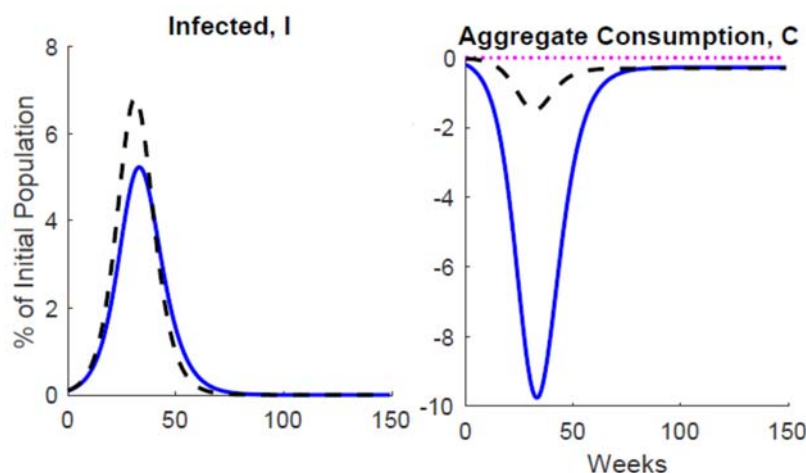
紹介する。これらの分析では、都市封鎖によって感染速度を遅らせ、ピークの感染者数を抑えようとする被害緩和（mitigation）政策を考えている。

(1) Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a)

Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a)では、基本再生産数は1.5と設定されている。経済活動を全停止するとこれを1まで低下させられるが、それは禁止的な費用がかかるので、都市封鎖をしても抑え込みはできず、被害緩和がとられることになる。

図1（原論文の図1）は、代表的個人が感染を予防する行動をとるとき（Basic SIR-Macro Model）と、対策を何もとらないとき（SIR Model）との対比をしている。このシミュレーションでは、ワクチンは考慮に入れていない。回避行動をとることで、感染流行のピークを抑えることができるが、そのための消費の低下は最大で10%に達する。

図1 Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a)による感染予防の分析

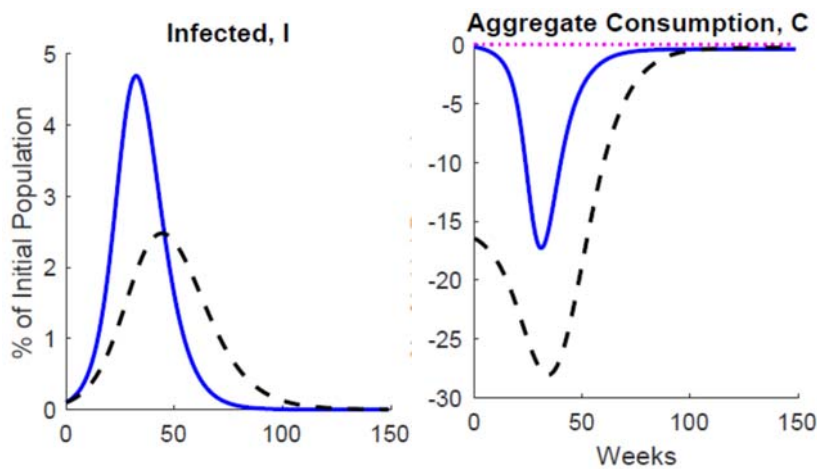


（注）実線は Basic SIR-Macro Model、点線は SIR Model。

（出所）Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a), Figure 1。

図2（原論文の図7）は、感染の外部性と医療資源制約による外部性が存在するときに、民間の対策のみの場合（Benchmark SIR-Macro Model）と社会全体の最適化を図った場合（Best Simple Containment Policy）を比較したものである。両者の差が公衆衛生的介入の効果になるが、介入による消費の減少は30%に及ぶ。また、ワクチン開発の可能性が考慮されていることから、介入は最初から行われることが望ましいという結果が得られている（ワクチンの他に治療法の開発も考慮している）。

図2 Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a)による自粛と公衆衛生的介入の分析

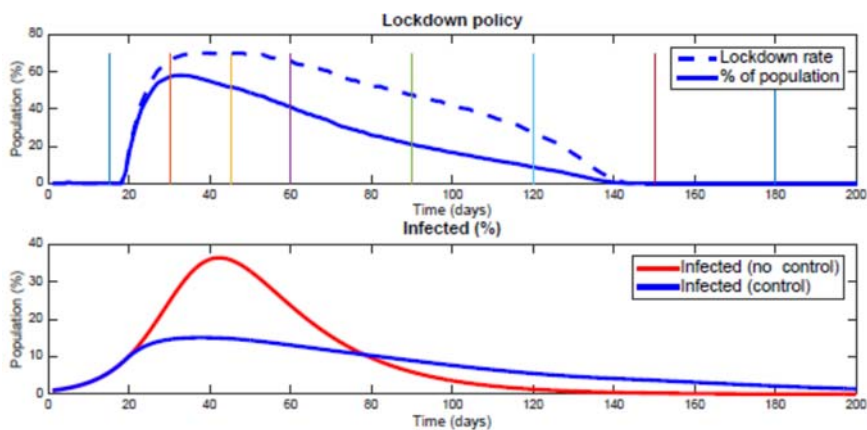


(注) 実線は Benchmark SIR-Macro Model、点線は Best Simple Containment Policy。
 (出所) Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a), Figure 7。

(2) Alvarez, Argente and Lippi (2020)

Alvarez, Argente and Lippi (2020)では基本再生産数が3.6と設定され、都市封鎖によって基本ケースで57.75%まで低下させることができる。図3(原論文の図1)では、3週目以降は大きく経済活動を制限して、感染拡大を抑えることが示されている。

図3 都市封鎖の効果



(出所) Alvarez, Argente and Lippi (2020, Figure 1)

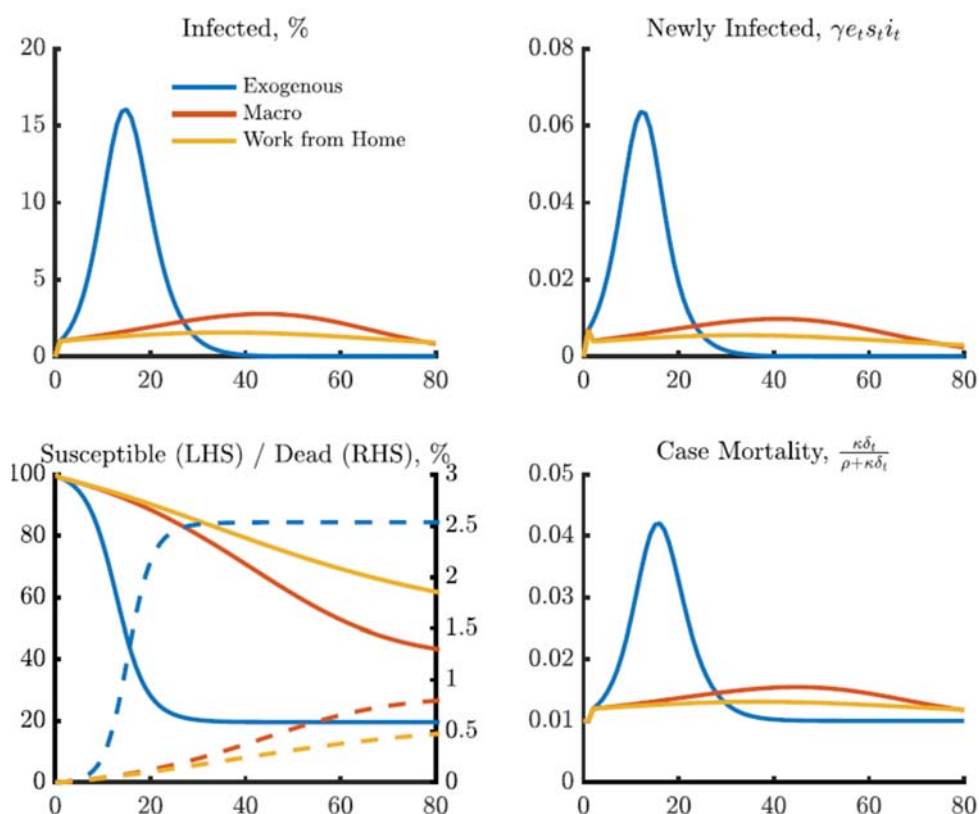
また、統計的生命価値の設定の感度分析を行っている。より人命を尊重すれば、感染を抑えようと都市封鎖が強くなると予想される。SIRモデルの非線形微分方程式を含む体系での動学最適化を行った結果から得られた数値であるものの、統計的生命価値の設定と都市封鎖による経済的損失にはほぼ比例関係があることがわかる。なお、都市封鎖による人的被害

の軽減額は、経済的損失のほぼ倍と推計されている。具体的な数値自体は、様々なパラメータの不確かさに影響されるので、額面通り受けとることなく、注意して解釈しなければならない。統計的生命価値の値が不確かであれば、感染症対策で許容される経済的損失もそれに比例して不確かになる。

(3) Jones, Philippon and Venkateswaran (2020)

Jones, Philippon and Venkateswaran (2020)では基本再生産数は2と設定されていて、経済活動を全停止すれば0.67まで低下させることができる。そもそも抑え込みが不可能な全停止までいかななくても、抑え込みをとれる余地がある。しかし、流行曲線をなだらかにするものの、緩やかに流行が広がる姿を描いている。図4（原論文での図3）では、図2に比較して、感染者を非常に大きく抑え込むことができている。なお、消費はすぐに40%程度低下する。この論文では、テレワークが感染防止策の手段として考慮されていて、テレワークができれば、落ち込みは20%弱になる。モデルの詳細は異なるものの、Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020a)と比較すると、都市封鎖の効率性についての感度分析と解釈できる。

図4 Jones, Philippon and Venkateswaran (2020)による都市封鎖の分析



(出所) Jones, Philippon and Venkateswaran (2020), Figure 3。

6. 検査による隔離

6.1 一律検査

都市封鎖では全員の行動を一律に制限するが、本節以降では、活動を制限する対象をしぼった対策の効率性を検討していく。本節で検討する検査による隔離では、感染者のみの行動を制限しようとする。感染者の人口に占める割合は低いので、同じ感染拡大防止効果を得るために必要となる行動制限は、都市封鎖よりも圧倒的に少なくすむと考えられる。

まず、全員のうちの τ の割合だけの検査をして、陽性者を隔離する対策(一律検査、universal testing)を検討する。つぎに、一律検査の効率を高めるグループ検査 (group testing) と、陽性者と接触のあった者を調査することで効率的に陽性者を隔離する積極的疫学調査 (contact tracing) との効率性を比較する。

本稿では、検査に誤差はないと単純化して仮定する。実際の検査では、陽性者を陽性者と判断できる確率(感度)、陰性者を陰性者と判断できる確率(特異度)は1よりも小さく、陽性者を陰性者と誤って判断すること(偽陰性)や陰性者を陽性者と誤って判断すること(偽陽性)が生じる。偽陰性と偽陽性の存在を具体的に考慮することは可能であり、両者は隔離の効率を低下させる影響をもつ。ただし、偽陽性については、ここでは捨象されている偽陽性者の行動を制限してしまう弊害にも注意が必要である。

感染者のうち、 ι の割合で隔離されているとすると、隔離された感染者 \tilde{I} は、

$$\tilde{I}(t) \equiv \iota(t)I(t)$$

と表される。感染者の動学は、(19)式に代わって、

$$\dot{I}(t) = \text{New} \left(1 - y(t), (1 - \tau(t)) \left(I(t) - \tilde{I}(t) \right), R(t) \right) - \gamma I(t) \quad (29)$$

と表される。各時点の新規感染者は、検査後に隔離されていない感染者から発生すると仮定している。隔離された感染者の動学は、

$$\dot{\tilde{I}}(t) = \tau(t)(1 - \gamma) \left(I(t) - \tilde{I}(t) \right) - \gamma \tilde{I}(t) \quad (30)$$

と表される。

簡単化のため、検査の限界費用を c で一定と仮定する。検査費用には検査に要する金銭費用だけでなく、受検者の時間の機会費用や心理的費用も含まれる。簡単化のため、陽性者が隔離されることの不効用や隔離にともなう経済損失は微小であって無視できると考えて、考慮すべき経済損失は、検査費用のみとする(c をそうした費用を含めた費用と設定することも可能である)。貨幣価値化された厚生損失は、

$$\frac{V_0 - V(0)}{u'(\bar{Y})} = \int_0^{\infty} e^{-(\rho+\nu)t} \left[N(t)y(t)\bar{Y} + c\tau(t) \left(N(t) - \tilde{I}(t) \right) + \phi(I(t))\gamma I(t)VSL \right] dt \quad (31)$$

となる。(12)式で感染者が就業できないことの生産の損失を捨象したことを平仄をとるため、ここでも隔離された者が就業できないことの生産の損失は捨象している。また、隔離の

ための検査のみを考え、医療行為として必要な検査は捨象する。モデルでは回復者は免疫を獲得するので検査は不要かもしれないが、現実には検査の対象となるかもしれない。(31)式では、検査対象になると想定しているが、検査対象としない想定も考えられる。

以上の設定によって、都市封鎖と同様の動学的最適化問題を、状態変数の動学である(20)、(21)、(29)、(30)式を制約とし、 y と τ を政策変数として、貨幣価値化された厚生損失(31)式を最小化する問題として定式化できる。以下で紹介する Chari, Kirpalani and Phelen (2020) は、このような設定に属する研究である。しかし、実際には検査装置や技師は固定生産要素であると考えられ、各時点で自由に検査件数を変えられるという想定は現実的ではない。そのため、実際に運用できる対策を記述する問題設定は別に考える必要がある。

検査による隔離の役割は、5節で分析された健康と経済のトレードオフの関係を緩和することである。検査による隔離があることで、経済活動の制限を緩和できることが期待できる。視点を変えると、検査の拡大によって、感染を防止しながら経済活動の制限を緩和できて一挙両得になるともいえる。ただし、検査自体については、拡大することで感染は抑止されるが費用は経済の負担になるという、健康と経済のトレードオフは存在する。

6.2 グループ検査

検査による隔離のなかでの比較については、検査陽性者 1 人を見つけるためにどれだけの費用がかかるかという費用対効果に着目して、優劣を議論できる。検査対象者のなかの陽性者の割合が非常に小さい場合には、一律検査ではほとんどの受検者が陰性となり、感染者を見つけ出す効率が悪い。検査による隔離の目的が隔離の対象を陽性者に限ることで経済活動の効率を高めることにあることを鑑みると、そのなかでも効率を高める方法を追求することが自然である。

陽性率が非常に小さいと見込まれる場合には、検体を混ぜて検査するグループ検査で効率を高めることが考えられる¹¹。例えば、1万人の検査対象のなかで陽性者が1人だけいるとすると、各人の検体を2つに分け、100人分の最初の検体を1つに混ぜて100個の検体を作ると、そのうちのどれか1つが陽性になる。つぎに、陽性となった検体に含まれた100人分のもう1つの検体を検査することで、陽性者を突き止めることができる。この方法では、200回の検査で1万人を検査することができる。検体採取費用は1万人分が必要であるが、検体の検査費用は大幅に節約できる。このような2段階の検査方法で、 N 人に1人の陽性者を見つけ出す検査回数を最小にするには、 $2\sqrt{N}$ 回を行えばよい¹²。陽性者の割合が著し

¹¹ 経済学者である Dorfman (1943)によって、グループ検査の先駆的研究がなされた。Augenblick et al. (2020)は、新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) のグループ検査の効率性を検討している。

¹² N 個の検体を a 人ごとにまとめて検査すると、第1段階で N/a 、第2段階で a の検査が必要になる。その合計を最小にする a は \sqrt{N} であり、検査回数は $2\sqrt{N}$ となる。

く低い場合には、まとめることのできる検体数によって検査回数が決まる。

6.3 積極的疫学調査

積極的疫学調査は、感染者の行動履歴を調査し、濃厚接触者の健康観察と検査を行う感染拡大予防対策である。検査陽性率は一律検査よりもはるかに高いので、陽性者を発見するにははるかに効率的であるが、検査対象は一部に限定されるので、対象以外の感染者は見逃される。

効率性の観点から、一律検査と積極的疫学調査は以下のように比較できる。検査対象のなかの陽性者が陰性者に比較して θ 倍多く選ばれていると、検査数は、 $\tau(1-l)I + \tau\theta^{-1}S$ となり、検査での陽性率は、

$$\frac{\tau(1-l)I}{\tau(1-l)I + \tau\theta^{-1}S} \quad (32)$$

となる。一律検査での陽性率は、

$$\frac{\tau(1-l)I}{\tau(1-l)I + \tau S} \quad (33)$$

となるので、積極的疫学調査での陽性率の一律検査の陽性率に対する倍率は、(32)式と(33)式から、

$$\frac{\tau(1-l)I/(\tau(1-l)I + \tau\theta^{-1}S)}{\tau(1-l)I/(\tau(1-l)I + \tau S)} = \frac{(1-l)I + S}{(1-l)I + \theta^{-1}S} = \frac{1 + (1-l)I/S}{\theta^{-1} + (1-l)I/S}$$

と計算される。陽性率が十分に小さい場合は、積極的疫学調査の陽性率はほぼ θ 倍になる。陽性率の逆数は、陽性者当たりの検査人数になるので、積極的疫学調査では一律検査よりも検査費用をほぼ θ の逆数まで小さくできる。ただし、積極的疫学調査では、 τ を高める費用は検査費用だけではなく、濃厚接触者を追跡するための費用も存在するので、費用の節約は θ の逆数よりも小さくなる。

一律検査と積極的疫学調査は二者択一ではなく、同時に実施されるのが現実的である。その際には、積極的疫学調査の方が陽性者を捕捉する確率が圧倒的に高いことから、検査のための資源を積極的疫学調査から一律検査に回すことは非効率である。そこで、積極的疫学調査が行われている状態から、一律検査を行うことの追加的便益と追加的費用を比較して、一律検査の是非を論じる議論をすることになる。

上に述べた一律検査の捕捉率は、積極的疫学調査が実施されない場合のものであるので、積極的疫学調査がされている場合に一律検査での陽性率は、上に述べたものよりかなり小さくなっていると考えられる。したがって、そのような状態で、一律検査がどの程度必要なのかは、①必要ない（一律検査を導入する段階ですでに限界便益が限界費用を下回っている）、②ある適切な規模が必要である（一律検査を導入する段階では限界便益が限界費用を

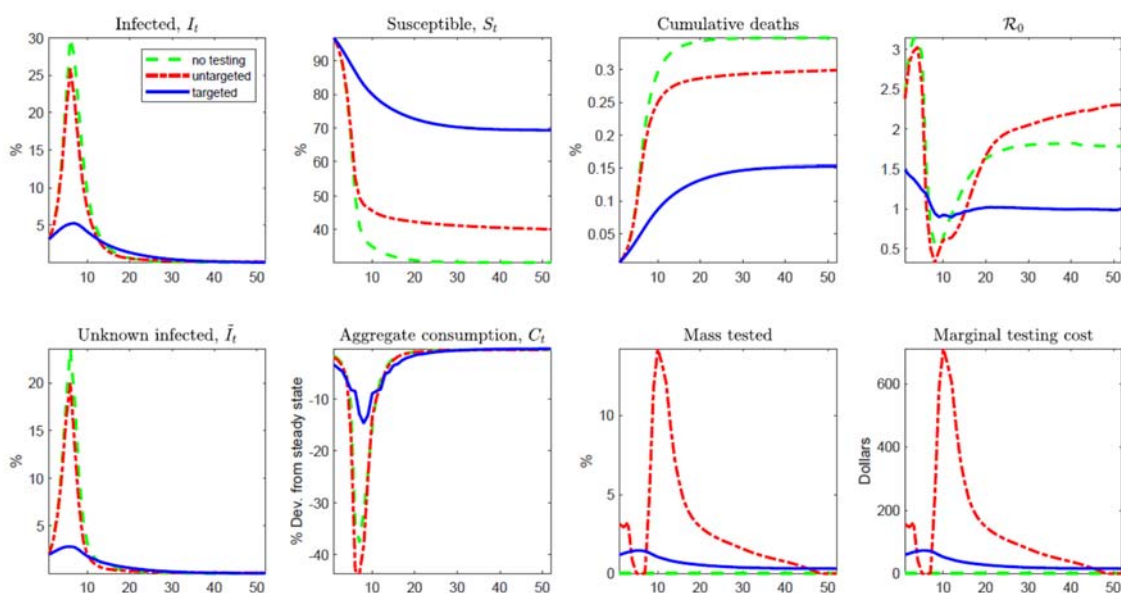
上回っているが、一律検査を拡大していく段階で限界便益と限界費用が等しくなる)¹³、③全員の検査が必要である（全員を検査するまで限界便益を限界費用が上回っている）、のいずれの可能性も考えられる。現実がいずれに該当するかは、現在の研究段階ではまだ見極められていないようである。

6.4 一律検査と積極的疫学調査のシミュレーション分析

(1) Chari, Kirpalani and Phelen (2020)

Chari, Kirpalani and Phelen (2020)は、各時点の検査能力を自由に設定できるという想定で、検査なし、一律検査、積極的疫学調査の比較を行っている。韓国の積極的疫学調査のデータをもとに θ を86と設定している。消費の恒常的低下を厚生損失の指標としているが、一律検査は、検査なしと比較して、厚生改善は消費の0.12%とごくわずかしかないが、積極的疫学調査の場合は、消費の2.48%の改善が見られる。図5（原論文の図6）では、積極的疫学調査では、再生産数 $\beta(t)/\gamma$ を低く抑えることができ、被害緩和のための経済活動の抑制（図では消費の落ち込み）も低く抑えられていることが示されている。

図5 検査なし、一律検査、積極的疫学調査の比較



(出所) Chari, Kirpalani and Phelen (2020), Figure 6.

最適な一律検査では、検査数が大きく増減することが示されているが、上で述べたように

¹³ Acemoglu et al. (2020b)は、本稿で捨象されている行動の要因によって、かならずしも検査頻度を上げることが望ましくない場合があることを指摘している。これは、検査頻度が上がると、陰性者が活動を活発にすることで感染機会が増えてしまう可能性である。

そのような柔軟な検査を実施することは難しいと考えられる。これも一律検査に頼ることの短所となる。

積極的疫学調査の検査数は比較的なだらかに推移する。したがって、これを実施する検査能力を維持することは、一律検査に比較してハードルが低い。なお、積極的疫学調査はその能力が制約になることが考えられ、追跡できる能力以上の感染者が発生する場合には、積極的疫学調査の効果が発揮できなくなる。

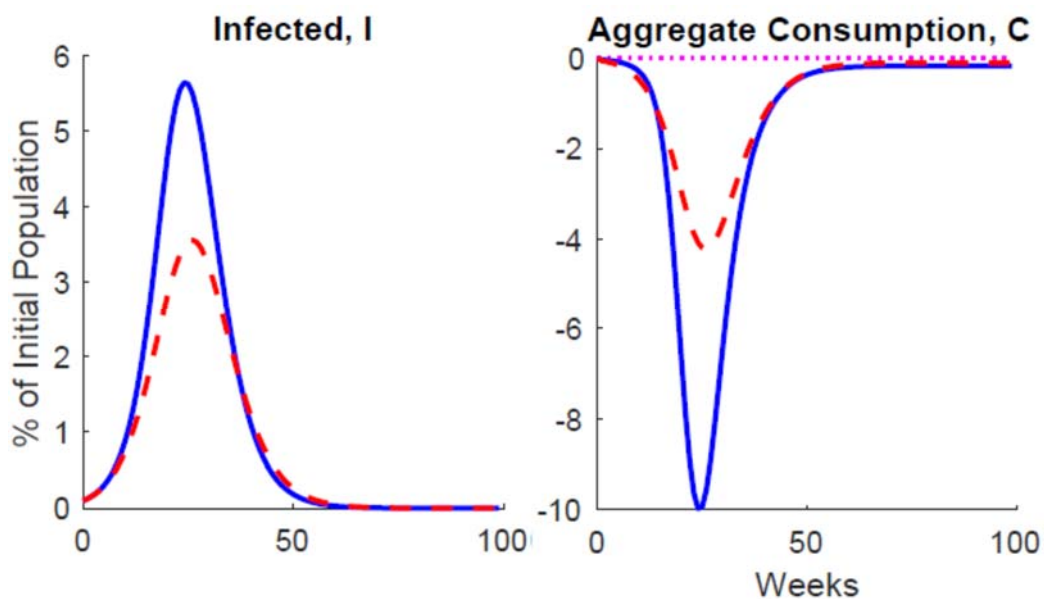
Chari, Kirpalani and Phelen (2020)は、検査をせずに隔離する対策も分析しており、一律検査と比較して消費の 1.41%に相当する厚生改善があると推計している。この結果から、検査の効果と隔離の効果を区別して考えることができる。検査をするのは陰性者を隔離する誤りをなくすためであり、そのことによる厚生改善は相当あるが、感染の可能性の高い者を隔離することによる厚生改善も大きいことがわかる。

(2) Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020b)

流行の初期には、検査の体制が整わない（短期に検査を拡大する費用が禁止的に高い）ので、効率面で劣る一律活動制限をとらざるを得ないが、検査体制を整備する時間が与えられれば、検査による隔離に切り替えることが効率的ではないかと考えられる。こうした状況に即した分析を行う Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020b)は、検査能力を自由に設定できるのではなく、次第に拡張していくという設定のもとで、民間による予防と一律検査を比較するシミュレーション分析を行っている。このモデルの時間単位は週であり、毎週、人口の α が毎週検査される人口に入るように検査体制が拡充していくと仮定している。検査による隔離では、陽性者の職場と消費活動での接触（全体の3分の1）が制限される場合（smart containment）と、すべての接触が制限される場合（strict containment）の2種類が考えられている。

図6（原論文の図4）では、市場均衡（民間による自衛）と一律検査を比較すると、一律検査で消費の落ち込みが大きく抑えられる。ここでの民間による自衛は、同じ著者による都市封鎖の効果を分析した図2と比較することが可能であり、一律検査による消費の落ち込みは都市封鎖よりもはるかに小さいことがわかる。

図6 市場均衡と検査による隔離の比較



(注) 実線は検査なし、点線は検査と隔離（接触の一部制限）。

(出所) Eichenbaum, Rebelo and Trabandt (2020b), Figure 4。

また、 α は2%を基準ケースとしているが、 α と厚生利得（消費の恒久的変化）の関係を示しているが、6%を超えると限界便益が小さくなることが示されている。

7. 多次元 SIR モデル

7.1 多次元 SIR モデルでの基本再生産数

すべての個人が同質的であると仮定した SIR モデルでは、新型コロナウイルス感染症の罹患率、致死率が年齢によって大きく違う現象を記述できない。こうした本質的に重要な現象を記述するには、個人を社会階層に分類した多次元 SIR モデルが使われる。ここでは、モデルの個人を n 個の年齢階層に分類したモデルを紹介する。年齢階層を添え字 i をつけて表そう。ある年齢階層の個人は、各年齢階層の個人と接触することによって感染する。年齢階層 i の新規感染者の発生は、

$$New_i(t) = S_i(t)C_{i1}(t)p_{i1}(t)\frac{I_1(t)}{N_1(t)} + \dots + S_i(t)C_{in}(t)p_{in}(t)\frac{I_n(t)}{N_n(t)} \quad (34)$$

となり、感染者の動学は、

$$\dot{I}_i(t) = New_i(t) - \gamma I_i(t) \quad (35)$$

と表される。感染機会は接触機会に比例すると考え、年齢階層 i の 1 人が接触する年齢階層 j の人数を C_{ij} 、接触者のうちの感染者の割合（二次発病率）を p_{ij} とする。ベクトルと行列を用いると、(35)式は、(34)式を用いて、

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1(t) \\ \vdots \\ \dot{I}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1(t)C_{11}(t)p_{11}(t)/N_1(t) & \dots & S_1(t)C_{1n}(t)p_{1n}(t)/N_n(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_n(t)C_{n1}(t)p_{n1}(t)/N_1(t) & \dots & S_n(t)C_{nn}(t)p_{nn}(t)/N_n(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(t) \\ \vdots \\ I_n(t) \end{bmatrix} - \gamma \begin{bmatrix} I_1(t) \\ \vdots \\ I_n(t) \end{bmatrix} \quad (36)$$

と書くことができる。感染症のモデルでは、離散時間モデルにして、各期間で感染が一斉に起きて、期間ごとに感染者がすべて入れ替わるという仮定のもとで「次世代行列」を定式化して、基本再生産数を定義する (Diekmann, Heesterbeek and Metz 1990、van den Driessche and Watmough 2002)。本稿では経済学での問題設定と調和させるために、次世代行列を用いず、SIR モデルの構造のまま議論を進める。

感染前の状態（感染者がおらず、全人口が未感染者）で線形近似すると、(36)式右辺の S が感染の無い状態での未感染者（つまり人口）で固定され、

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1(t) \\ \vdots \\ \dot{I}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}p_{11}N_1(0)/N_1(0) & \dots & C_{1n}p_{1n}N_1(0)/N_n(0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1}p_{n1}N_n(0)/N_1(0) & \dots & C_{nn}p_{nn}N_n(0)/N_n(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(t) \\ \vdots \\ I_n(t) \end{bmatrix} - \gamma \begin{bmatrix} I_1(t) \\ \vdots \\ I_n(t) \end{bmatrix} \quad (37)$$

となる。(37)式での C_{ij} と p_{ij} は、感染前の状態での値を示す。(37)式のベクトルと行列に記号をつけると、

$$\dot{I}(t) = (B - \gamma I)I(t) \quad (38)$$

となる。ここで、

$$B = \begin{bmatrix} C_{11}p_{11}N_1(0)/N_1(0) & \dots & C_{1n}p_{1n}N_1(0)/N_n(0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1}p_{n1}N_n(0)/N_1(0) & \dots & C_{nn}p_{nn}N_n(0)/N_n(0) \end{bmatrix}$$

である。記号が紛らわしいが、(38)式の右辺の括弧内の I は単位行列である。感染が拡大するかどうかは、行列 $B - \gamma I$ の固有値によって決まる。

B は個人の接触機会を表すので、ある年齢階層とある年齢階層がまったく（感染につながる）接触をもたないということは考えにくい。そこで、 B のすべての要素は正であると仮定すると、ペロン=フロベニウスの定理により、 B の固有値のなかで絶対値が最大のもの β_0 （ペロン=フロベニウス根）は単独根であり、正の実数である。これは同時に B の固有値のなかで実数部が最大のものとなる¹⁴。また、行列 $B - \gamma I$ の固有値は $\beta - \gamma$ なので、 $\beta_0 - \gamma$ は $B - \gamma I$ の固有値の実数部で最大のものとなる¹⁵。感染者が(38)式に基づいて推移すると、 $\beta_0 - \gamma > 0$ であれば感染は拡大する。そして、まもなく各年齢階層の感染者が同じ率（ $\beta_0 - \gamma$ ）で成長する状態に近づいていく。 β_0/γ が多次元 SIR モデルでの基本再生産数と定義され、これが1より大きいとき、感染は拡大する。また、このときの感染者の年齢階層別分布は、ペロン=フロベニウス根に対応する固有ベクトルで規定される¹⁶。

行列 B を定量化するには、以下のような方法がある。 p_{ij} はすべて異なる値をとることができるように定式化した。実際にデータを扱う際には、パラメーターの数を減らす仮定をいれざるを得ない。それらには、

- ① すべて同じ値である、
- ② 感染のしやすさは同じだが、感染のさせやすさは年齢階層で異なる（ $p_{ij} = p_j$ ）、
- ③ 感染のさせやすさは同じだが、感染のしやすさは年齢階層で異なる（ $p_{ij} = p_i$ ）、
- ④ 感染のしやすさ、させやすさはそれぞれの年齢階層の違いだけで生じる（ $p_{ij} = p_i p_j$ ）
のような定式化が考えられる。

欧州で社会階層間の接触回数を調査した研究に POLYMOD があり、同様の調査が日本でも Ibuka et al. (2016)、Munasinghe, Asai and Mishiura (2019)によって行われている。

「外出8割自粛」のような、一律の接触削減は、この行列の要素を一律に低下させようとするものである。しかし、このように集団ごとの詳細なデータがあると、対象をしぼった接触削減の効果を推測することができる。

¹⁴ 正の実数 β_0 は固有値のなかで絶対値が最大であることから、これ以上大きな実数部をもつ固有値は存在しない。

¹⁵ 行列 B の固有値を β とすると、 $|B - \beta I| = 0$ を満たすので、同時に $|B - \gamma I - (\beta - \gamma)I| = 0$ を満たす。したがって、行列 $B - \gamma I$ の固有値は、 $\beta - \gamma$ である。行列 B の固有値 β のなかで β_0 が最大の実数部をもつことから、 $\beta_0 - \gamma$ は $B - \gamma I$ の固有値のなかで最大の実数部をもつ。

¹⁶ β に対応する固有ベクトルを x とすると、 $Bx = \beta x$ を満たすので、同時に $(B - \gamma I)x = (\beta - \gamma)x$ を満たす。したがって、 β に対応する固有ベクトルは、行列 $B - \gamma I$ の固有値 $\beta - \gamma$ に対応する固有ベクトルでもある。また、ペロン=フロベニウス根に対応する固有ベクトルのすべての要素は正である。

7.2 選択的な (targeted) 経済活動制限

個人のタイプを区別しないで一律に経済活動制限を課すよりも、個人のタイプに応じて制限を変える政策の方が政策の自由度が増すので、効果が高いことは明らかである。しかし、個人のタイプを識別するために莫大な費用がかかるとすれば、一律制限の方の費用対効果が高くなることがあるので、一概に一律制限が否定されるわけでもない。これは、6節の一律検査での議論で見たものである。

しかし、政策の効果に大きな違いがあり、費用をかけずに識別できる社会階層が存在する。新型コロナウイルス感染症の致死率については、高齢者と若年層との間に文字通り桁違いの差がある。産業についても、感染リスクの高い産業と低い産業の差がある。多次元 SIR モデルを用いて、リスクの差のある社会階層ごとに異なった経済活動制限を設ける政策を検討することには重要な意義がある。

ここまでの議論では代表的個人の効用を政策の目的関数と定義できたが、多次元 SIR モデルでの社会的厚生関数の特定化には、概念的な困難に直面する。Glover et al. (2020)は社会的厚生関数を特定化しているが、Acemoglu et al. (2020)は社会的厚生関数を設定せず(18)式に相当する貨幣価値化された厚生損失を設定している。本稿は後者にしたが、5節のモデルと沿う形で定式化し、最適化問題は、 y_i を年齢階層*i*に対する活動制限として、

$$\min_{y_i(t)} \int_0^{\infty} e^{-(\rho+\nu)t} \left[\sum_i N_i(t) y_i(t) \bar{Y} + \sum_i \phi_i \left(\sum_j I_j(t) \right) \gamma I_i(t) VSL \right] dt \quad (39)$$

と表される。1次元モデルの(19)式に相当する感染者の動学は、

$$\dot{I}_i(t) = New_i(1 - y(t), I(t), R(t)) - \gamma I_i(t) \quad (40)$$

となる。ここで、 $1 - y$ は年齢階層ごとの行動制限を示すベクトル、 R は年齢階層別の回復者・死亡者のベクトルである。年齢階層別の回復者・死亡者の動学は、

$$\dot{R}_i(t) = \gamma I_i(t) \quad (41)$$

となり、年齢階層別の死亡者の動学は、

$$-\dot{N}_i(t) = \phi_i \left(\sum_j I_j(t) \right) \gamma I_i(t) \quad (42)$$

となる。

最適な政策は(40)、(41)、(42)式を制約として(39)式を解く問題となるので、ハミルトン関数を

$$\begin{aligned}
H^*(t) &= e^{-(\rho+\nu)t}H(t) \\
&= e^{-(\rho+\nu)t} \left\{ \sum_i N_i(t)y_i(t)\bar{Y} + \sum_i \phi_i \left(\sum_j I_j(t) \right) \gamma I_i(t) VSL \right. \\
&\quad + \sum_i \lambda_{I,i}(t) [New_i(1-y(t), I(t), R(t)) - \gamma I_i(t)] + \sum_i \lambda_{R,i}(t) \gamma I_i(t) \\
&\quad \left. + \sum_i \lambda_{N,i}(t) \left[-\phi_i \left(\sum_j I_j(t) \right) \gamma I_i(t) \right] \right\}
\end{aligned}$$

とし、年齢階層*i*の最適な経済活動制限が内点解である場合の最適化の条件は、

$$\frac{\partial H(t)}{\partial y_i(t)} = N_i(t)\bar{Y} - \sum_j \lambda_{I,j}(t) \frac{\partial New_j(t)}{\partial (1-y_i(t))} = 0 \quad (43)$$

で与えられる。

また、共役変数の動学は、

$$\begin{aligned}
\dot{\lambda}_{I,i}(t) - (\rho + \nu)\lambda_{I,i}(t) &= -\frac{\partial H(t)}{\partial I_i(t)} \\
&= -VSL\phi_i \left(\sum_j I_j(t) \right) \gamma - VSL \sum_j \phi_j' \left(\sum_k I_k(t) \right) \gamma I_j(t) - \sum_j \lambda_{I,j}(t) \frac{\partial New_j(t)}{\partial I_i(t)} \\
&\quad + \lambda_{I,i}(t)\gamma - \lambda_{R,i}(t)\gamma + \lambda_{N,i}(t)\phi_i \left(\sum_j I_j(t) \right) \gamma + \sum_j \lambda_{N,j}(t)\phi_j' \left(\sum_k I_k(t) \right) \gamma I_j(t) \\
\dot{\lambda}_{R,i}(t) - (\rho + \nu)\lambda_{R,i}(t) &= -\frac{\partial H(t)}{\partial R_i(t)} = -\sum_j \lambda_{I,j}(t) \frac{\partial New_j(t)}{\partial R_i(t)} \\
\dot{\lambda}_{N,i}(t) - (\rho + \nu)\lambda_{N,i}(t) &= -\frac{\partial H(t)}{\partial N_i(t)} = -y_i\bar{Y}
\end{aligned}$$

となる。これらの共役変数は、

$$\begin{aligned}
\lambda_{I,i}(t) &= \int_t^\infty e^{-(\rho+\nu+\gamma)(s-t)} \left[(VSL - \lambda_{N,i}(s)) \left(\phi_i \left(\sum_i I_i(s) \right) \gamma \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \sum_j \frac{\lambda_{N,j}(s)}{\lambda_{N,i}(s)} \phi_j' \left(\sum_i I_i(s) \right) \gamma I_j(s) \right) + \sum_j \lambda_{I,j}(s) \frac{\partial New_j(s)}{\partial I_i(s)} + \lambda_{R,i}(s)\gamma \right] ds \\
\lambda_{R,i}(t) &= \int_t^\infty e^{-(\rho+\nu)(s-t)} \sum_j \lambda_{I,j}(s) \frac{\partial New_j(s)}{\partial R_i} ds
\end{aligned}$$

$$\lambda_{N,i}(t) = \int_t^{\infty} e^{-(\rho+v)(s-t)} y_i(s) \bar{Y} ds$$

と表すことができる。

活動制限に関する最適条件である(43)式を整理すると、

$$\sum_j \lambda_{i,j}(t) \frac{\partial New_j(t)}{\partial (1 - y_i(t))} = N_i(t) \bar{Y} \quad (44)$$

となる。年齢階層によって異なった水準の行動制限を加えることができるとき、どの年齢階層の制限が強くなるかは(44)式によって考察することができる。左辺は、ある年齢階層の行動が制限されることによって死亡者が減少する便益である。 $\lambda_{i,j}$ が含まれていることは、1人の感染者を減らすことの便益を比較すると、死亡リスクの高い年齢階層の感染者を減らすことが、より便益を高めることになる。しかし、これは直ちに死亡リスクの高い年齢階層の行動をより強く制限することが正しいことを意味しない。他の年齢階層の行動制限が死亡リスクの高い年齢階層に感染させることを減らす便益も考慮の対象になるので、この便益が大きければ他の年齢階層の行動制限が優先されることもあり得る。また、費用が年齢階層の人口に比例しており、人口の少ない年齢階層の制限を強化する理由になる。

モデルを特定化して、年齢階層の人口比の影響を検討してみよう。年齢階層を若年者（添え字1で表す）と高齢者（添え字2）の2種類から構成されると考える。若年者の致死率は0で近似されるものとし、人的被害は高齢者の死亡者のみを考慮する（ $\lambda_{i,1} = 0$ ）。密度依存接触を考え、新規感染者の発生を

$$New_i(t) = \beta_{i1}(t)(1 - y_i(t))S_i(t)(1 - y_1(t))I_1(t) + \beta_{i2}(t)(1 - y_i(t))S_i(t)(1 - y_2(t))I_2(t) \quad (45)$$

と特定化する。

初期に活動制限がないとき、若年者に行動制限を課すことの限界便益と限界費用の比は、(45)式を用いると、

$$\frac{\lambda_{i,2}\beta_{21}S_2I_1}{N_1\bar{Y}}$$

となる。同様に、高齢者に行動制限を課すことの限界便益と限界費用の比は、

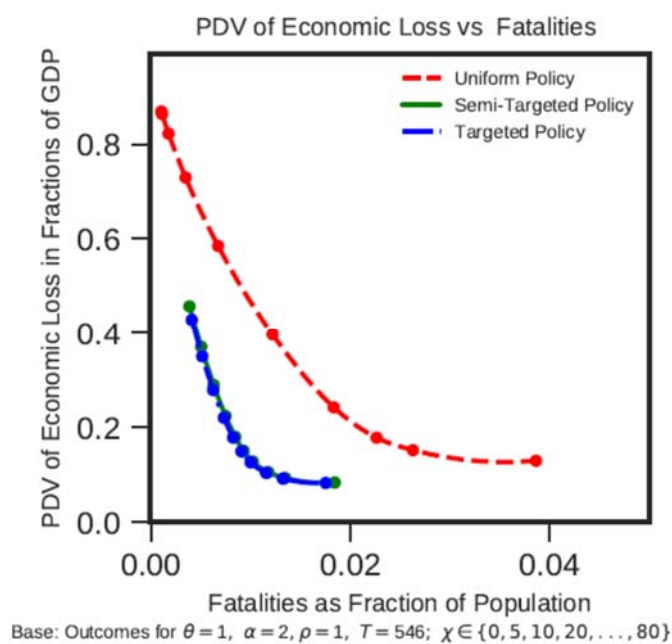
$$\frac{\lambda_{i,2}(\beta_{21}S_2I_1 + 2\beta_{22}S_2I_2)}{N_2\bar{Y}}$$

となる。高齢者の人的被害のみを考慮しているため、限界便益は高齢者に行動制限を課す方が大きくなっている。一般には若年者が高齢者よりも人口が多いことから、限界費用も高齢者が低いと考えられる。ここでのモデルでは、若年者と高齢者の生産への貢献は等しいと仮定しているが、退職した高齢者の生産への貢献が低ければ、さらに高齢者の限界費用が低い理由となり得る。これらのことから、高齢者に活動制限を課すことが得策である。

Acemoglu et al. (2020)は、年齢階層を3分割（20-49、50-64、65-）し、それぞれに活動制限を課す政策の分析を行い、高齢者の制限が若年者の制限よりも重くする政策が望ましいことを示した。図7（原論文の図7）は、異なった統計的生命価値の設定に対する最適な

政策の帰結を横軸に死亡者の人口に占める割合、縦軸に生産の減少（対 GDP 比）をとって示したものである。原点に向かうほど、死亡者が少なく、生産の減少が少なくなり、健康と経済の指標が改善する。赤の点線はすべての個人に一律の活動制限を課す政策の帰結であり、健康をより重視すると死亡者は減少するが生産の減少が大きくなるという、健康と経済のトレードオフが観察できる。青の点線は年齢階層別に制限した政策の帰結であるが、実線よりも左下にあることが示されている。赤の実線は、若年の 2 階層を区別せず、高齢者層と若年層とでの 2 種類の制限を課した政策の帰結である。この帰結を示す線は、3 階層ごとに制限を課した政策の帰結を示す線（青の点線）とほぼ重なっている。このことから、高齢者を保護して、若年層の活動にほぼ制限を加えないという単純化された政策が、細かな政策の帰結とほぼ同じであることが示されており、高齢者とそれ以外に区別することが重要であることを示している。

図 7 選択的な制限によるトレードオフの改善



(出典) Acemoglu et al. (2020), Figure 7。

上で考察された政策では、ある年齢階層の活動制限はすべての年齢階層との接触を同率で減らすことになるが、接触の制限をより細かに設定でき、若年者と高齢者の接触と若年者同士の接触を別々に制限できたとすれば、さらに効果的な政策が可能になるものと考えられる。ただし、このような政策が、モデルの設定通りに社会に実装できるわけではない。若年層の活動をほぼ制限せず、高齢者を隔離するという解は、スウェーデンで実際にとられた対策に似ているが、実際には高齢者の施設への面会制限が不十分で、施設での高齢者の死亡率が高く、対策が手放しで成功と評価されているわけではない。現実には、モデルのように

簡単に高齢者の感染リスクを減らせるわけではないという危険性を考慮に入れる必要がある。

選択的な活動制限では、制限を受ける者と受けない者との間に負担の格差が生じる。(39)式で示された厚生損失は負担の総量を評価しており、負担の分散は考慮外である。これは、所得再分配によって、個人間で負担の平準化が図られていることを暗黙に想定しているとも解釈できる。現実でも、制限を受ける者への補償がないと、政治的・社会的緊張を高める可能性がある。

モデルの解を現実社会に実装するには、モデル分析でより細かなタイプを考慮する必要がある。例えば、制限を産業別に課す場合には、異なったモデルの定式化が必要となってくる。

7.3 産業別の活動制限

Baqae et al. (2020)は、都市封鎖の解除 (reopen) において、どの産業から制限を緩和するか、という問題を検討した。この研究では、人口を 5 つの年齢階層 (0-19、20-44、45-64、65-74、75-) に区分する多次元 SIR モデルが用いられている (正確には、潜伏期間、隔離、死亡の状態も加えられたモデルになっている)。POLYMOD のデータに基づいて接触数が設定され、接触場所が家庭、職場、その他の 3 つに区別される。年齢階層 i と年齢階層 j の接触数は、3 つの場所の接触数の合計として、

$$C_{ij}(t) = C_{ij}^{home}(t) + \sum_k C_{ij,k}^{work}(t) + C_{ij}^{others}(t) \quad (46)$$

となる。ここで、職場での接触は 66 産業 (k の添え字で表す) に区別されていて、ある年齢階層の職場での接触は、その年齢階層の産業別の就業者数に比例する ($C_{ij,k}^{work} \propto L_{i,k}$) と想定する。

年齢階層別・産業別の就業者数のデータは、アメリカ地域社会調査 (American Community Survey) を使用している。また、各産業の生産 (GDP) は、その産業の就業者の増加関数で表され、

$$Y_k(t) = Y_k \left(\sum_i L_{i,k}(t) \right) = Y_k(L_k(t))$$

と表すことにする。実質 GDP と各産業の実質 GDP は、

$$P(t)Y(t)N(t) = \sum_k P_k(t)Y_k(L_k(t)) \quad (47)$$

で関係づけられる。ここで、 P と P_k はデフレーターである。(47)式を全微分して、名目 GDP で除すると、

$$\frac{dY(t)N(t)}{Y(t)N(t)} = \sum_k \frac{P_k(t)}{P(t)Y(t)N(t)} \frac{\partial Y_k}{\partial L_k}(t) dL_k(t) = \sum_k \frac{w_k(t)L_k(t)}{P(t)Y(t)N(t)} \frac{dL_k(t)}{L_k(t)} \quad (48)$$

となる。(48)式の最後の等式では、労働の価値限界生産力が賃金 w に等しい ($P_k \partial Y_k / \partial L_k =$

w_k) という関係を使っている。(48)式を変形すると、

$$\frac{d \log Y(t)N(t)}{dL_k(t)} = \frac{w_k(t)L_k(t)/P(t)Y(t)N(t)}{L_k(t)}$$

となり、ある産業の就業者の変化に対する GDP の変化率の反応は、名目 GDP に占めるその産業の労働所得の割合と就業者数の比となる。このようにして、感染機会と経済活動の関係が産業別に定量化される。

しかし、このモデルを使ってどの産業から再開していくかという問題設定をすると、産業の数とタイミングが政策変数となり、政策変数の数が多すぎて、厳密には解けなくなる。そこで、全体のタイミングの決定は棚上げして、ある時点で許容される感染者数の水準のもとで生産を最大化するには、産業別にどのように活動制限を緩和すればよいか、を考えよう。初期時点では、就業者の抑制を緩和したときの GDP の増加率と基本再生産数の増加幅の比

$$\theta_k = \frac{d \log Y(0)N(0)/dL_k(0)}{d\mathcal{R}_0/dL_k} \quad (49)$$

を考え¹⁷、比の大きい産業から制限を緩和すればよいと考えられる¹⁸。

Baqae et al. (2020)は、この比を北米産業分類 (NAICS) による産業別に求めている。表 3 は、その結果 (原論文の付表 1) の抜粋である。 θ は中央値をゼロ、75%点と 25%点の差が 1 となるように変換してある (変換前の θ は、25%点 0.36、50%点 0.92、75%点 1.50 であった)。NAICS の産業名の定訳がないため、原語のまま表記した。

表 3 感染リスク当たりの経済価値が高い産業

NAICS	産業	θ
55	Mgmt of companies and enterprises	38.636
523	Securities, commodity contracts, and investments	22.516
5411	Legal svcs	22.350
211	Oil and gas extraction	9.175
5415	Computer systems design and related svcs	6.662
524	Insurance carriers and related atvs	4.411
511	Publishing inds, exc internet (includes software)	2.221
541OP	Misc professional, scientific, and technical svcs	1.707
334	Computer and electronic products	1.515

¹⁷ (49)式右辺の分母は、(37)式の行列の固有値の実数部の最大値が行列の要素の関数になるとみなして、微分を定義している。さらに、(46)式を通じた接触数と就業者数の比例関係が感染前経済でも成立し、行列の要素は産業の就業者数の関数になると考えている。

¹⁸ 初期時点ではなく、政策を実施する時点での計算をすることも考えられる。この場合、(49)式右辺の基本再生産数ではなく、実効再生産数の変化幅をとることになる。

42	Wholesale trade	1.295
----	-----------------	-------

(出典) Baqaee et al. (2020)、Appendix Table 1。

表 3 は、感染リスク当たり経済価値が高い、上位 10 産業を示した。ここには、金融、法律サービス、企業経営・管理、ソフトウェア開発、出版等が入っている。専門技術サービスで付加価値が高いことや、リモートワークが可能なのが、こうした産業が上位に並ぶ理由の一つと考えられる。おおむね米国が強い業種であるが日本では弱い業種なので、この結果がそのまま日本でも当てはまるかどうかはわからない。

表 4 は、感染リスク当たり経済価値が低い産業を示したものである。 θ の値が接近しているので、表 3 よりも多くの産業を示している。ここには、接触が必要な業態が並んでいるが、なかには医療、福祉、運輸、教育という、止めることができないか、止めることの費用が大きい産業があり、これらの産業を閉鎖することの費用がここでの分析枠組みで十分に考慮されていないという問題がある。他の産業としては、飲食、宿泊、娯楽が入っていて、これらは現に最も制限が課された産業になっている。

表 4 感染リスク当たりの経済価値が低い産業

NAICS	産業	θ
721	Accommodation	-0.493
621	Ambulatory health care svcs	-0.524
441	Motor vehicle and parts dealers	-0.541
711AS	Performing arts, sports, museums, and related atvs	-0.560
622	Hospitals	-0.566
23	Construction	-0.583
623	Nursing and residential care facilities	-0.636
713	Amusements, gambling, and recreation inds	-0.672
4A0	Other retail	-0.675
452	General merchandise stores	-0.681
624	Social assistance	-0.683
525	Funds, trusts, and other financial vehicles	-0.686
722	Food svcs and drinking places	-0.697
HS	Housing	-0.706
445	Food and beverage stores	-0.718
485	Transit and ground passenger transportation	-0.735
61	Educational svcs	-0.736

(出典) Baqaee et al. (2020)、Appendix Table 1。

感染機会と生産活動の関係づけは、今後の研究で改良の余地があるかもしれない。比のごくわずかの差は、推計誤差によるものかもしれず、細かな順位にこだわらず、大きな傾向を見るべきであろう。こうした分析が制限の根拠となった場合には、該当する産業にとっては死活問題になるだけに、分析の精度を高めることは非常に重要である。

現実の経済活動の制限は、このような研究がないうちに、直観的な推測で実施されていたと思われるが、この推定結果に大きく反するものではなく、大勢としては妥当なものだったと思われる。ただし、産業を選択して制限を行うことは一部の産業が大きな負担を負うことになるので、負担を負った産業をどう支援するかが重要な課題である。

8. 結論

本稿では、新型コロナウイルス感染症の流行を念頭に、民間と政府を合わせた感染症対策の規範分析に関する最近の知見を解説してきた。経済活動と感染症の流行を関係づけたモデルに基づき、社会の厚生を最大化する政策を考えることで、健康と経済を同時に考慮した対策を設計する理論的基礎が与えられる。経済活動を制限すると、感染症の流行も抑制され、そこに健康と経済のトレードオフが存在する。新型コロナウイルス感染症の流行の第 1 波のなかで各国でとられた都市封鎖は、広範囲に経済活動を制限する政策であり、その経済的被害は極めて大きかった。

一律の活動制限と比較して、対象を選別して活動を制限する対策をとることで、効率性を高めることができる可能性がある。それぞれの対策のもとでは、人的被害を減らそうとすると、経済的被害が生まれるという意味での健康と経済のトレードオフが存在するが、一律の活動制限との比較では人的被害と経済的被害の両方を軽減することが可能になる。一律の活動制限と選択的な活動制限とは、トレードオフの関係ではない。

対象を選別するための属性には、年齢や産業のような、費用がほぼかからず識別できるものや、感染者との濃厚接触や病原体保有の有無のような、費用をかけないと識別できないものがある。感染症流行の初期段階では、活動と感染リスクの関係に関して年齢階層や産業で細分化された知見が蓄積されておらず、検査能力も限定されていたので、都市封鎖のような一律の制限が実際に利用できる選択肢であった。第 2 波以降では、選択的な活動制限による対策が実行可能であり、都市封鎖や、それより緩い形での一律の経済活動制限が用いられる局面は考えにくい。そして、望ましい対策の探求は、これまで実施された対策との間で健康と経済のトレードオフの関係にしたがうものではなく、両者をともに改善する可能性があることが考えられる。

本稿は規範分析に限っても膨大な研究の一部を解説したにすぎず、本稿ではくわしく触れられなかった論点や課題にも重要なものは数多く存在する。最後に 4 つの課題を指摘して、本稿を閉じることにしたい。第 1 に、規範分析の基礎となるモデルのパラメーターに関する知識は重要であり、頑健な推定値を得るための研究を進める必要がある。第 2 に、対象を選別した対策の効果に関する知見を深めることで、より費用対効果の高い感染症対策を識別することが必要である。第 3 に、感染症による被害や感染症対策による被害は個人や階層間に偏在するが、それが社会全体で平準化する所得再分配の仕組みを現実の政策としてどのように実装するかは、簡単な問題ではない。第 4 に、多くの研究が免疫が永続する SIR モデルに基づいているが、免疫が持続しない SIS モデル等に基づく分析も今後は重要になってくると思われる。

参考文献

- Acemoglu, Daron, et al. (2020a), "A Multi-Risk SIR Model with Optimally Targeted Lockdown," NBER Working Paper No. 27102, May.
- Acemoglu, Daron., et al. (2020b), "Testing, Voluntary Social Distancing and the Spread of an Infection," NBER Working Paper No. 27483, July.
- Alvarez, Fernando E., David Argente and Francesco Lippi (2020), "A Simple Planning Problem for COVID-19 Lockdown," NBER Working Paper No. 26981, April.
- Atkeson, Andrew (2020), "What Will Be the Economic Impact of COVID-19 in the US? Rough Estimates of Disease Scenarios," NBER Working Paper No. 26867, March.
- Atkeson, Andrew, Karen Kopecky and Tao Zha (2020), "Estimating and Forecasting Disease Scenarios for COVID-19 with an SIR Model," NBER Working Paper No. 27335, June.
- Avery, Christopher, et al. (2020), "Policy Implications of Models of the Spread of Coronavirus: Perspectives and Opportunities for Economists," NBER Working Paper No. 27007, April.
- Baqae, David, et al. (2020), "Policies for a Second Wave," forthcoming in *Brookings Papers on Economic Activities*.
- Begon, M., et al. (2002), "A Clarification of Transmission Terms in Host-microparasite Models: Numbers, Densities and Areas," *Epidemiology & Infection*, Vol. 129, Issue 1, pp. 147-153. <https://doi.org/10.1017/S0950268802007148>
- Chari, Varadarajan V., Rishabh Kirpalani and Christopher Phelen (2020), "The Hammer and the Scalpel: On the Economics of Indiscriminate versus Targeted Isolation Policies during Pandemics," NBER Working Paper No. 27232, May.
- Diekmann, O., J. A. P. Heesterbeek and J. A. J. Metz (1990), "On the Definition and the Computation of the Basic Reproduction Ratio R_0 in Models for Infectious Diseases in Heterogeneous Populations," *Journal of Mathematical Biology*, Vol. 28, pp. 365–382. <https://doi.org/10.1007/BF00178324>
- van den Driessche, P., and James Watmough (2002), "Reproduction Numbers and Sub-threshold Endemic Equilibria for Compartmental Models of Disease Transmission," *Mathematical Biosciences*, Vol. 180, Issues 1–2, November–December, pp. 29-48. [https://doi.org/10.1016/S0025-5564\(02\)00108-6](https://doi.org/10.1016/S0025-5564(02)00108-6)
- Dorfman, Robert (1943), "The Detection of Defective Members of Large Populations," *Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 14, No. 4, pp. 436-440. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177731363>
- Eichenbaum, Martin S., Sergio Rebelo and Mathias Trabandt (2020a), "The

- Macroeconomics of Epidemics," NBER Working Paper No. 26882, March.
- Eichenbaum, Martin S., Sergio Rebelo and Mathias Trabandt (2020b), "The Macroeconomics of Testing and Quarantining," NBER Working Paper No. 27104, May.
- Ellison, Glenn (2020), "Implications of Heterogeneous SIR Models for Analyses of COVID-19," NBER Working Paper No. 27373, June.
- Farboodi, Maryam, Gregor Jarosch and Robert Shimer (2020), "Internal and External Effects of Social Distancing in a Pandemic," NBER Working Paper No. 27059, July.
- Ferguson, Neil M., et al. (2006). "Strategies for Mitigating an Influenza Pandemic," *Nature*, 442: 448-452. <https://doi.org/10.1038/nature04795>
- Ferguson, Neil M., et al. (2020), "Impact of Non-pharmaceutical Interventions (NPIs) to Reduce COVID-19 Mortality and Healthcare Demand." <https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/medicine/mrc-gida/2020-03-16-COVID19-Report-9.pdf>
- Fernandez-Villaverde, Jesus, and Charles I. Jones (2020), "Estimating and Simulating a SIRD Model of COVID-19 for Many Countries, States, and Cities," NBER Working Paper No. 27128, May.
- Garibaldi, Pietro, Espen R. Moen and Christopher A. Pissarides (2020), "Modelling Contacts and Transitions in the SIR Epidemics Model," *COVID Economics*, Issue 5, April 16, pp. 1-20.
- Gersovitz, Mark, and Jeffrey S. Hammer (2004). "The Economical Control of Infectious Diseases," *Economic Journal*, Vol. 114, No. 492, January, pp. 1-27.
- Giannitsarou, Chryssi, Stephen Kissler and Flavio Toxvaerd (2020), "Waning Immunity and the Second Wave: Some Projections for SARS-CoV-2", CEPR Discussion Paper 14852, June.
- Glover, Andrew, et al. (2020), "Controlling a Pandemic," NBER Working Paper No. 27046, June.
- Gollier, Christian and Stephane Straub (2020), "Some Micro/macro Insights on the Economics of Coronavirus. Part 2: Health Policy," VoxEU, 03 April.
- Gonzalez-Eiras, Martin, and Dirk Niepelt (2020a), "On the Optimal 'Lockdown' During an Epidemic," *COVID Economics*, Issue 7, April 20, pp. 68-87.
- Gonzalez-Eiras Martin, and Dirk Niepelt (2020b), "Optimally Controlling an Epidemic," CEPR Discussion Paper DP15541, December.
- Hall, Robert E., Charles I. Jones, and Peter J. Klenow (2020), "Trading Off Consumption and COVID-19 Deaths," NBER Working Paper No. 27340, June.
- Ibuka, Yoko, et al. (2016), "Social Contacts, Vaccination Decisions and Influenza in Japan,"

- Journal of Epidemiology & Community Health*, Vol. 70, Issue 2, pp.162-167.
<https://doi.org/10.1136/jech-2015-20577>
- Jones, Callum J., Thomas Philippon and Venky Venkateswaran (2020), "Optimal Mitigation Policies in a Pandemic: Social Distancing and Working from Home," NBER Working Paper Series No. 26984, April.
- Kermack, W. O., and A.G. McKendrick (1927), "A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics," *Proceedings of Royal Society of London A*, Vol. 115, pp. 700–721. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>
- Kissler, Stephen M., et al. (2020), "Projecting the Transmission Dynamics of SARS-CoV-2 Through the Postpandemic Period," *Science*, April 14.
<https://doi.org/10.1126/science.abb5793>
- Munasinghe, Lankeshwara, Yusuke Asai and Hiroshi Nishiura (2019), "Quantifying Heterogeneous Contact Patterns in Japan: A Social Contact Survey," *Theoretical Biology and Medical Modelling*, 16:6. <https://doi.org/10.1186/s12976-019-0102-8>
- Petrongolo, Barbara and Christopher A. Pissarides (2001), "Looking into the Black Box: A Survey of the Matching Function." *Journal of Economic Literature*, Vol. 39, No. 2, June, pp. 390-431.
- Pindyck, Robert S. (2020), "COVID-19 and the Welfare Effects of Reducing Contagion," NBER Working Paper No. 27121, May.
- Rowthorn, Robert, and Flavio Toxvaerd (2020), "The Optimal Control of Infectious Diseases via Prevention and Treatment," Cambridge-INET Working Paper Series No: 2020/13, April.
- Schelling, Thomas C. (1968), "The Life You Save May Be Your Own," in Samuel B. Chase, Jr. ed., *Problems in Public Expenditure Analysis*, Washington, DC: Brookings Institution, pp. 127–62.
- Scherbina, Anna D. (2020), "Determining the Optimal Duration of the COVID-19 Suppression Policy: A Cost-Benefit Analysis."
- Toxvaerd, Flavio (2020), "Equilibrium Social Distancing," Cambridge-INET Working Paper Series No: 2020/08, March.