

# 日本における新型コロナウイルス感染症 の計量分析\*

王 芮†

## 【要旨】

本稿では、まず、日本における新型コロナウイルス感染症の実効再生産数  $R_t$  をカルマンフィルターで推計し、次に推計された実効再生産数  $R_t$  を利用して、OxCGRT の指数系列と時変係数回帰を行い、時変係数で感染症対策の効果を定量的に評価する。最後に、時変係数回帰から得られた係数系列と OxCGRT の対策インディケータ系列に対して、ステップワイズ回帰分析を行い、日本では具体的にどのような感染症対策が効いているかを識別する。本稿の分析から以下の結論が得られている。緊急事態宣言という一連の感染症対策は基本的に感染の抑制に効いていることが確認されているが、しかし、感染の流行が長期化して、緊急事態宣言の効果が次第に衰弱してきていることは時変回帰の結果から明らかになっている。ステップワイズ回帰の結果を見る限り、具体的に、隔離や移動制限のような感染症対策はその有効性が高いが、公共衛生関係の対策はそれほど効果を示していないということも言える。また、経済支援対策は、統計的に感染症流行の抑制に効果が出ているという結果も得られている。

---

\* 本研究は「立正大学研究推進・地域連携センター支援費（第3種）」の助成を受けたものである。

† 立正大学経済学部。E-mail: wangrui@ris.ac.jp

**【キーワード】** COVID-19, 感染症対策, 実効再生産数  $R_t$ , 時変係数回帰, ステップワイズ回帰

## 1. イントロダクション

2019 年の年末, 中国湖北省武漢市で流行が爆発した新型コロナウイルス感染症 (Coronavirus Disease 2019, COVID-19) はまもなく世界規模のパンデミックとなり, 今だに終息の兆しが見えていない. 本稿が執筆された時点まで, 全世界ではすでに 1 億 9 千万人以上の感染者が確認され, 420 万人ぐらいの死亡者が出ている<sup>1</sup>. 2021 年に入ってから, ワクチンの開発が成功し, 世界各国でワクチンの接種が進められて, 感染の拡大がある程度抑制されつつあるという状況ではあるが, 変異株の出現で感染が再び拡大し, 今後, COVID-19 の流行が長期化する可能性も予想されているため, ソーシャルディスタンス, 感染者隔離, 移動制限や在宅要請といった非薬学的介入 (Non-Pharmaceutical Interventions, NPIs) は世界各国の政府にとって依然として感染症を抑制するうえで重要な対策である.

日本では, 2020 年 1 月から 2021 年 6 月末まで, 感染が「第 1 波」から「第 4 波」まで 4 回にわたって急拡大を繰り返してきた. また, 7 月から感染が再び拡大して, 「第 5 波」が確実に来ていると言われている. これまで政府は感染拡大を抑制するために, 2020 年 4 月 7 日から 2020 年 5 月 25 日まで第 1 回の緊急事態宣言を発出した. その後, 2021 年に入り, 1 月 8 日から 3 月 31 日までの第 2 回, 4 月 25 日から 6 月 20 日までの第 3 回, 7 月 12 日から 8 月 22 日 (予定) までの第 4 回と, 4 回の「緊急事態宣言」が発出されてきた. 緊急事態宣言期間において, 休校, 終電の繰り上げ, 在宅勤務の要請, 外出の自粛要請, 休業要請, 営業短縮, 酒類の提供禁止, イベント人数の制限など, 様々な感染症対策が講じられてきた<sup>2</sup>. また, 地域によっては, 宣言が解除されても, 一部の規制のみが緩和さ

<sup>1</sup> COVID-19 に関するリアルタイムの統計データは世界保健機関が提供しているウェブダッシュボード (<https://covid19.who.int>) から確認できる.

<sup>2</sup> 各回の緊急事態宣言期間では, 具体的な対策や対象地域が異なるため, 詳細は内閣官

れるという形で「まん延防止等重点措置」が継続されている。図 1 では、これまで日本における COVID-19 の基本的な状況が示されている。

図 1 のパネル (a) の新規感染者数推移を見ると、これまで感染が「第 1 波」から「第 4 波」まで 4 回にわたって急拡大を繰り返してきた。7 月以来、新規感染者数の急増が激しく、7 月 30 日に確認された新規感染者数がはじめて 1 万人を越えた。緊急事態宣言が 4 回発出されても、今だに、日本では、COVID-19 の流行が抑えられていない。このような状況に鑑みて、これまでの感染症対策をどう評価するか、また、具体的にどのような感染症対策が効いているか、これらの問題を定量的に分析して、暫定的な結論を出すことは今後感染症対策を実施していくうえで必要不可欠であると考えられる。定量分析において、感染症の流行を感染者数の推移で捉えることが当然できるが、図 1 と図 2 から明らかに見て取れるように、感染者数の時系列データが非定常である可能性があり、見せかけ回帰になってしまう可能性が大きいため、回帰分析に向いているとは限らない。また、国別に感染の状況を比較する際に、各国の人口規模が大きく異なるため、感染者数の比較はそもそも意味をなさない。故に、本稿では、感染流行の指標として、実効再生産数 (effective reproduction number,  $\mathcal{R}_t$ ) を用いる。実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の推計について、いくつかのアプローチが存在する。一つは SIR モデルといった疫学区画モデルから  $\mathcal{R}_t$  を明示的に導出して、それをデータで推計する方法である。最近の研究として Kucharski, Adam J., et al. (2020) と Dehning, Jonas, et al. (2020) はこの方法で COVID-19 の実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の推計値を出している。もう一つのアプローチとしては、感染症の発症間隔 (serial interval, SI) のデータを用いて推計する方法である。Cori, Anne, et al. (2013) がベイズ法で実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  を推計し、さらに、Thompson, R. N., et al. (2019) がその方法を R のパッケージ EpiEstim で実装している。従来の推計方法では、新規感染者数の発生がポアソン分布に従う、あるいは、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  が「一定期間」で変化しないといった仮定が置かれたうえで、推計が行われる。この「一定期間」の選択は研究者の

---

房のホームページ (<https://corona.go.jp/emergency/>) を確認されたい。

判断によるものであり、合理的な推計値を得るために、パラメータのチューニング作業が必要になる。最近、Arroyo Maroli, Francisco, et al. (2020) は上記の 2 つのアプローチをバランスよく融合して、疫学モデルから導出された実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  をカルマンフィルターで推計している。彼らの方法では、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  を導出するための理論モデルが標準的な SIS モデルや一般化された SIR モデルでも通用するため、理論モデルの仮定が最小限に留められている<sup>3</sup>。また、新規感染者数が特定の分布に従うという仮定も必要ではなく、特定のパラメータに対するチューニング作業もいらない。状態空間システムにカルマンフィルターを適用すると、観測できない状態変数のスムージング・フィルタリング・予測が得られる。本稿では、Arroyo Maroli, Francisco, et al. (2020) の方法に従い、日本における COVID-19 の実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  を推計する。

感染症対策を定量的に捉えるために、オックスフォード大学が開発した Oxford COVID-19 Government Response Tracker (OxCGRT)<sup>4</sup> は世界各国で実施されている感染症対策をリアルタイムに記録し、それを数量化したうえで、4 種類の指数として発表している。具体的に、各種対策が 5 つのカテゴリ（隔離と閉鎖、経済支援、公共衛生、ワクチン、上記以外の対策）に分類されたうえで、各対策の強さに合わせて、序数 (0, 1, 2, …) でその対策が数量化されて、インディケータとして記録されている。例えば、国際移動コントロールという対策では、制限なしの場合が 0 として記録され、海外からの入国者に対するスクリーニング検査が 1、一部の海外地域からの入国者に対する隔離が 2、一部の海外地域に対する入国禁止が 3、さらに、すべての海外地域に対する入国禁止、あるいは、国境閉鎖が 4 という形で記録されている。また、数量化された各種対策は政府反応指数 (government response index)、隔離と衛生指数 (containment and health index)、強度指数 (stringency index)、経済支援指数 (economic support index) という 4 種類の指数に集計される。各種対策の定義、指数の作成方法など、OxCGRT の

<sup>3</sup> 通常、理論モデルが複雑になればなるほど、必要なパラメータの数が増えるため、推計が複雑にする。

<sup>4</sup> <https://covidtracker.bsg.ox.ac.uk>を参照されたい。

詳細については、Hale, Thomas, et al. (2020) とその Github のページ<sup>5</sup> で詳細な説明が提供されている。経済支援指数で表わされる経済支援対策は感染症の制御に直接働きかけるわけではないため、本稿では、ほかの3種類の指数を使って、日本における感染症対策の効果を定量的に評価する。図3と図4では、日本の OxCGRT のデータが示されている。3種類の指数およびその作成に使われた対策インディケータは表1にまとめられている。

本稿では、上記のデータを利用して、以下の手法で日本における COVID-19 の計量分析を行う。

1. SIR モデルから導出された状態空間システムをカルマンフィルターで推計し、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の推計値を得る。
2. 推計された実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の系列と OxCGRT の指数系列をもって、両変数に対して時変係数回帰を行う。時変係数の推計値を用いて、日本における COVID-19 に対する感染症対策を定量的に評価し、感染症対策の効果を数量化する。
3. 時変回数回帰から得られた時変係数と OxCGRT の対策インディケータをもって、ステップワイズ回帰を行い、具体的にどのような感染症対策が効いているかを識別する。

以上の分析を経て、結論を先取って述べると、本稿では、以下の結論が得られている。日本では、政府の感染症対策は COVID-19 の流行拡大にとって基本的に有効であると言える。しかし、度重なる緊急事態宣言の効果は弱くなってきていることも本稿で確認されている。休業要請、営業短縮といったある程度強制力を持つ対策以外に、政府としては国民の自粛により、感染拡大が食い止められるという戦略に賭けていると考えられる。感染流行の初期段階では、例えば、第1回の緊急事態宣言が確かに実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の上昇を大きく抑制していた。しかし、感染の流行が終息せず長期化している現状を考えると、いわゆる「自粛疲れ」が目立つようになり、緊急事態宣言が出されても、回帰分析の結果を見る限り、そ

<sup>5</sup> <https://github.com/OxCGRT/covid-policy-tracker>を参照されたい。

れが感染症の流行拡大にどれだけ抑止力があるかというのは疑問的である。日本では、これまでの対策をさらに強化すること、例えば、国民の自由の制限に伴う対策、その実施は確かに難しいと考えられるが、政府にとって、現行の行政及び法律システムに基づいて、さらに有効な感染症対策が求められている。

以下は本稿の構成を説明する。第 2 節はデータの説明、実効再生産数  $R_t$  の推計、時変係数回帰及びステップワイズ回帰について説明する。第 3 節では、実証分析の結果に対して、解釈を行う。第 4 節では、実証分析の結果をまとめて、本稿のテーマについて展望を行う。COVID-19 に対して、疫学、薬学、経済学など、様々な分野で日々研究が行われている。新たな研究成果やデータの蓄積もあり、将来的には、本稿のテーマをもう一回振り返って再考察する時期もいずれ来るということはここで断っておく。

## 2. 実証分析

### 2-1. データ

本稿の実証分析に必要なデータは新規感染者数と OxCGRT の指数及び対策インディケータである。新規感染者数及びそのほかの COVID-19 に関する時系列統計データはオックスフォード大学の Our World in Data<sup>6</sup> から取得できる。第 2-2 節で説明するが、新規感染者数をそのまま使うのではなく、感染性状態にある人口の推移を表す (4) 式から感染者数  $I_t$  を再帰的に導出する。また、感染者数  $I_t$  の再帰的導出において、平均感染期間の設定が必要になるため、本稿のベンチマーク設定として、平均的な感染期間を 7 日間に設定した場合、(4) 式に従って導出された感染者数  $I_t$  の推移は図 2 で示されている。さらに、(5) 式に従って感染者数  $I_t$  の系列の原データを成長率  $G_t$  に変換して、感染者数の成長率  $G_t$  のデータ系列を状態空間システムの観測方程式 ((6) 式) の観測変数のデータとして利用する。

---

<sup>6</sup> <https://ourworldindata.org/coronavirus>を参照されたい。

第1.節で紹介された感染症対策を数量化した  $O_xCGRT$  の指数系列と対策インディケータ系列は図3と図4で与えられる。また、 $O_xCGRT$  の指数系列の記述統計は表2で与えられている。本稿で使う3系列は同時に更新されるわけではないため、一定のタイムラグが存在し、データの欠損値があることに留意されたい。

## 2-2. 実効再生産数 $\mathcal{R}_t$ の推定

実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  は疫学および感染症の分野において、非常に重要な概念の一つである。実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  は一次的感染者によって、平均的に何人の二次的感染者が発生するかをリアルタイムに示す時変的な数字であり、通常、感受性人口の変化、感染症対策、医療条件により、感染症の流行とともに変化する。実務上、リアルタイムに実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  を把握することは感染症対策を行ううえで必要不可欠なことである。また、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  と似た概念として基本再生産数 (basic reproduction number,  $\mathcal{R}_0$ ) も感染症の感染力を示す指標としてよく利用されている。基本再生産数  $\mathcal{R}_0$  はすべての人口が感受性状態にある場合、一次的感染者によって、平均的に何人の二次的感染者が発生するかを示す。SIR モデルや SEIR モデルといった標準的な疫学区画モデルでは、 $\mathcal{R}_t > 1$  が成立する限り、感染性人口が増え続けて、感染症の流行が拡大する。 $\mathcal{R}_t < 1$  が成立する場合、感染性人口が減り続けて、感染症の流行が終息に向かう。

以下は Arroyo Maroli, Francisco, et al. (2020) に従い、標準的な離散時間 SIR モデルに確率的な攪乱項に入れて、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  を推計するための状態空間システムを導出する。 $S_t$ 、 $I_t$  と  $R_t$  はそれぞれ感受性状態 (susceptible)、感染性状態 (infectious) と回復状態 (recovered) にある人口の数を表す。SIR モデルでは、感染状態から回復した場合、免疫が獲得されるので、再び感受性状態に戻ることがないという設定になっている。また、感染状態から回復する確率を  $\gamma$  で表して、平均感染期間が  $\gamma^{-1}$  で与えられる<sup>7</sup>。 $\beta_t$  は時変的な伝達係数 (time-varying transmission coefficient) を表す。SIR モデルでは、新規感染者数は質量作用の法

<sup>7</sup> 疫学では、平均感染期間が指数分布に従うと仮定されている。



則 (the law of mass function) で決定され,  $\beta_t \frac{S_{t-1}I_{t-1}}{N}$  で与えられる.

$$S_t - S_{t-1} = - \left( \beta_t \frac{S_{t-1}I_{t-1}}{N} + \varepsilon_{S,t} \right) \quad (1)$$

$$I_t - I_{t-1} = \left( \beta_t \frac{S_{t-1}I_{t-1}}{N} + \varepsilon_{S,t} \right) - (\gamma I_{t-1} + \varepsilon_{I,t}) \quad (2)$$

$$R_t - R_{t-1} = \gamma I_{t-1} + \varepsilon_{I,t} \quad (3)$$

ここでは,  $\varepsilon_{S,t}$  と  $\varepsilon_{I,t}$  はそれぞれ感受性人口と感染性人口の変化に影響を与える確率的な要因として与えられる. 例えば, 「スーパー・スプレッダー」の出現は  $\varepsilon_{S,t}$  によって捉えられる. 通常の離散時間 SIR モデルは確定的な動学システムであり, パラメータと初期状態が与えられれば, 各変数の動学も一律に決定されることになる. 確率的な要因をモデルに取り入れることで, 実際のデータに見られた複雑な変動を捉えることができる. 確率項を無視して初期状態 ( $I_0 = C_0$ ) を指定すれば, (4) 式から新規感染者数  $C_t$  のデータから感染性人口数  $I_t$  を再帰的に導出することができる.

$$I_t = (1 - \gamma)I_{t-1} + C_t, \quad t = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

系列  $I_t$  の再帰を導出する際に,  $\gamma$  の値を先行研究から取得する. 本稿では  $\gamma$  の値について, 平均的に先行研究と一致して,  $\gamma^{-1} = 7$  をベンチマークケースとして設定している. また,  $\gamma^{-1}$  は感染症の発症間隔にも対応しているため, COVID-19 の発症期間に関する推計結果から,  $\gamma^{-1}$  の値は概ね 4~9 の間を取ることが知られている. Nishiura et al. (2020) は 28 組の「感染者・被感染者」のデータを対数正規分布に従う発症間隔に当てはめ,  $\gamma^{-1}$  の平均値と標準偏差をそれぞれ 4.7 日 (95%信頼区間: 3.7 日~6.0 日) と 2.9 日 (95%信頼区間: 1.9 日~4.9 日) と推計している.  $C_t$  は毎日の新規感染者数を表し, 実際のデータに対応する. 感染性人口  $I_t$  の変化率を  $\mathcal{G}_t = \frac{I_t - I_{t-1}}{I_{t-1}}$  で定義して,  $\mathcal{G}_t$  を (4) 式から以下のように導出できる.

$$\mathcal{G}_t = \frac{I_t - I_{t-1}}{I_{t-1}} = \gamma \left( \frac{\beta_t}{\gamma} \frac{S_{t-1}}{N} - 1 \right) + \frac{\varepsilon_{S,t} - \varepsilon_{I,t}}{I_{t-1}} \quad (5)$$



(5) 式では、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  が  $\mathcal{R}_t = \frac{\beta_t}{\gamma} \frac{S_{t-1}}{N} = \mathcal{R}_0^{(t)} \frac{S_{t-1}}{N}$  で定義される。  $\mathcal{R}_0^{(t)}$  は時点  $t$  における基本再生産数を意味する。感染症の流行の初期段階<sup>8</sup>では、感受性人口が総人口にほぼ一致するので、  $S_t \approx S_{t-1} \approx N$  が成立する。よって、  $\mathcal{R}_t = \frac{\beta_t}{\gamma}$  も成立する。また、  $\frac{\varepsilon_{S,t} - \varepsilon_{I,t}}{I_{t-1}}$  を  $\varepsilon_t$  に書き換えて、(5) 式を以下のように書き換える。

$$G_t = \gamma(\mathcal{R}_t - 1) + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim \text{I.I.D. } \mathcal{N}\left(0, \sigma_\varepsilon^2\right) \quad (6)$$

伝達係数  $\beta_t$  は下記のランダムウォークプロセスに従うと仮定する。

$$\beta_t = \beta_{t-1} + \bar{\eta}_t \quad (7)$$

実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の定義に従って上記の式を以下のように書き換える。

$$\mathcal{R}_t = \mathcal{R}_{t-1} + \eta_t, \quad \eta_t \sim \text{I.I.D. } \mathcal{N}\left(0, \sigma_\eta^2\right) \quad (8)$$

(8) 式では、  $\eta_t = \frac{\bar{\eta}_t}{\gamma}$  で攪乱項が再定義されている。(6) 式と (8) 式からなる状態空間システムでは、状態変数  $\mathcal{R}_t$  と観測変数  $G_t$  が (6) 式 (観測方程式) でリンクされ、状態変数  $\mathcal{R}_t$  の変化が (8) 式 (状態方程式) で表される。上記の状態空間システムはカルマンフィルターによって推計できる。COVID-19 流行の初期段階である 2020 年 1 月において、新規感染者が確認されない日も多いため、本稿では、データの欠損期間を取り除いて、2020 年 2 月 1 日から 2021 年 7 月 30 日までの期間を推計期間として、カルマンフィルターで実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  のスージング推計値を出す。  $\gamma^{-1}$  が  $\gamma^{-1} = 7$  に設定されるベンチマークケースの推計結果は図 5 で与えられている。また、先行研究では  $\gamma^{-1}$  が取りうる範囲が示されているので、その範囲を考慮して  $\gamma^{-1}$  が  $\gamma^{-1} = 5, 6, \dots, 10$  に設定される場合、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の推計値は図 6 で与えられている。頑健性のチェックとして、図 6 から確認できるように、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の推計値の変動パターンは  $\gamma^{-1}$  の値にあまり影響されていないということが分かる。

<sup>8</sup> ここでいう初期段階とは、感染された人口が総人口に対して非常に低い割合を占めている状態を意味する。COVID-19 の場合、日本では、感染の流行が始まってすでに 1 年半以上が経っているが、累計感染者数は 90 万人ぐらいいで、総人口数に対して、その割合が 1% 未満で非常に小さい。

### 2-3. 時変係数回帰

本稿では、Kalaba and Tesfatsion (1989) によって提案されたフレキシブル最小二乗法 (Flexible Least Squares, FLS) を使用して、下記の式を推計する。

$$\log \mathcal{R}_t = \beta_{0,t} + \beta_{1,t} \log \text{Index}_t + \varepsilon_t \quad (9)$$

ここでは、 $\text{Index}_t$  が OxCGRT の指数を表す。FLS 推計から時変係数  $\beta_{1,t}$  が得られる。 $\beta_{1,t} = \frac{\partial \log \mathcal{R}_t}{\partial \log \text{Index}_t}$  が成立するため、 $\beta_{1,t}$  に対して、「OxCGRT の指数で測った感染症対策の強度が 1% 上昇すると、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  が  $\beta_{1,t}\%$  変化する」という解釈ができる。当然、 $\beta_{1,t}$  の記号がマイナスになることは感染症対策が実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  を統計的に引き下げる、言い換えると、感染症対策の効果が働いて、感染症の流行が抑制されるということの意味する。OxCGRT の指数と実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  との時変係数回帰で得られた時変係数  $\beta_{1,t}$  の系列は図 7 で与えられている。また、時変回帰ではなく、(9) 式を最小二乗法で回帰すると、 $\beta_{1,t}$  はサンプル期間中、感染症対策が感染症の流行に対する平均的な効果を表す。表 3 では、(9) 式の最小二乗推定値が与えられている。(9) 式の定式化では、 $\text{index}_t$  と  $\mathcal{R}_t$  の間に、タイムラグが存在しないことが仮定されている。もちろん、感染症対策がすぐ効果を出すのではなく、一定の期間が経ってから効果が現れてくるということ想定すると、 $\text{index}_t$  のラグ項を (9) 式に追加すべきであると考えられるし、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  に影響を与えるほかの変数を追加することも可能ではあるが、タイムラグをどのように設定するか<sup>9</sup>、あるいは、どのような変数を追加すべきかについては、必ずしも明確な理論的根拠、あるいは、実証のエビデンスが存在するわけではないため、本稿では、タイムラグ、あるいは、ほかの外生変数の追加を考慮せず、(9) 式の定式化をそれ以上に拡張しないことにする。

<sup>9</sup> 統計的に、モデルの説明力を最大化するという意味で、AIC・BIC といった情報基準を使ってラグの回数を決める方法が存在するが、モデルのフィットを改善するための便宜的な方法であるため、理論的な根拠が乏しいと考えられている。もちろん、感染症対策が実施されてから、効果を出すまでのタイムラグがどれくらいあるかについては、必ずしも理論的に解明されているわけではないと考えられる。

## 2-4. ステップワイズ回帰

各指数系列と実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  との時変係数回帰から得られた時変係数系列を対応する指数系列にまとめられた対策インディケータの集合に回帰する (10) 式では、表 1 と図 4 から確認できるように、複数の対策インディケータの間に、多重共線性が存在する可能性が高く、通常回帰では、(10) 式の推計がうまくできないと考えられる。そのため、本稿では、最適な回帰変数の組み合わせを決定するために、Derksen and Keselman (1992) によって提案されたステップワイズ回帰を利用する。ステップワイズ回帰は多重共線性を回避する変数選択の方法として、多変量の統計分析で広く利用されている。

$$\beta_{1,t} = \gamma_0 + \gamma_i \sum_i Indicator_{i,t} + \varepsilon_t \quad (10)$$

$\sum_i Indicator_{i,t}$  はステップワイズ回帰によって決定された説明変数の組み合わせを表し、 $\gamma_i$  が各説明変数に対応する回帰係数である。表 4、表 5 と表 6 では、(10) 式の回帰結果がまとめられている。

## 3. 推計結果の分析

(6) 式と (8) 式からなる状態空間システムから、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  のスムージング推計が得られる。図 5 から読み取れるように、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  が 1 の周辺で上昇と下落を繰り返している。緊急事態宣言期間において、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の下落が認められるが、宣言が解除されたら、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  が再び上昇に転じるというパターンは図 5 から確認できる。また、先行研究に従って、異なる  $\gamma^{-1}$  の設定のもとで、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の推計も行われた。当然、図 6 から観察できるように、大きい  $\gamma^{-1}$  が長い発症間隔に対応して、感染性が強いことを意味するので、大きい  $\gamma^{-1}$  のもとで推定された実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  もそれなりに大きくなるが、基本的な変動パターンが  $\gamma^{-1}$  の選択に関係なく、推計された各系列は一致するような変動を持っている。直近の第 4 回緊急事態宣言において、7 月末まで実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の下落が認められず、感染が依然として拡大状態にあるという

ことは図5と図6から確認できる。

次に、(9)式の回帰結果を考察する。(9)式の回帰では、 $\gamma^{-1} = 7$ というベンチマーク設定のもとで推計された $\mathcal{R}_t$ を使用する。表3は最小二乗法による(9)式の回帰結果を示している。サンプル期間では、いずれの指数系列で捉えた感染症対策も実効再生産数 $\mathcal{R}_t$ に統計的に有意にマイナス影響を与えている。例えば、1%の有意水準で隔離と衛生指数で測った感染症対策の強さが1%上昇すると、平均的に実効再生産数が平均的に0.492%下落する。図7は(9)式の時変係数 $\beta_{1,t}$ のプロットである。 $\beta_{1,t}$ が0を下回る時期では、感染症対策がうまく効いていることが示唆されている。また、 $\beta_{1,t}$ の値がマイナスになればなるほど、感染症対策の効果が強く現れることを意味する。この図から確認できるように、第1回の緊急事態宣言の効果が最も明らかに現れていたが、その後第2・3回の緊急事態宣言の効果は第1回と比べて、次第に衰えている。また、直近の第4回緊急事態宣言が7月12日に発出されてからすでに2週間以上が経過しているが、今だに抑制効果ははっきり現れていない。

OxCGRTの各指数系列を使った(9)式の時変係数回帰から推計された $\beta_{1,t}$ の系列を感染症対策の効果の代理変数と見なして、対策インディケータをその指数系列に対応する $\beta_{1,t}$ の系列にステップワイズ回帰することで、具体的にどのような対策が感染症の抑制効果を出しているかを識別できると考えられる。表4の回帰結果を以下のように説明できる。政府反応指数で測った感染症対策の効果を表す $\beta_{1,t}$ を解釈する際に、C3(公共イベントのキャンセル)、H3(接触追跡)がステップワイズ回帰のアルゴリズムで内生変数のリストから排除されている。C1(学校閉鎖)、C4(集会制限)、C5(公共交通規制)、C6(在宅要請)、E1(家計の収入に対する支援)、E2(家計の債務に対する支援)が統計的に有意となっている。また、表5の結果から、C1(学校閉鎖)、C4(集会制限)、C6(在宅要請)、H3(接触追跡)、H8(高齢者に対する保護)に対応する回帰係数が有意にマイナスとなっていることから、これらの対策の有効性が確認されている。表6から、C1(学校閉鎖)、C5(公共交通規制)、C6(在宅要請)、C8(国際移動のコントロー

ル)の有効性が確認されているが、H1(公共宣伝活動)の有効性が統計的に認められていないということが分かる。以上の回帰結果をまとめると、閉鎖・隔離・規制といったような感染症対策は全体的にその有効性が認められているが、公共衛生関係の感染症対策がそれほど効いているとは言いにくい。もちろん、表5では、H3(接触追跡)とH8(高齢者に対する保護)の有効性が認められるが、表4では、当該変数の有意性が確認されていない。ステップワイズ回帰で分かったもう一つの重要な結果として、経済支援関係の対策(E1とE2)は感染症の抑制に効果があるということである。COVI-19の影響で仕事を失って、収入が大きく減少した家計にとって、ローンの返済や生活を維持するうえで、仕事探しやアルバイトといった対面接触による感染の可能性を伴う活動が避けられない。家計に対する収入支援・債務救済は家計の外出を減らす可能性があり、間接的に接触による感染の可能性を軽減できる。これは経済支援関係の対策による感染症の抑制効果に対する一つの解釈であると考えられる。

## 4. ま と め

以上の分析を踏まえて、本稿を以下のようにまとめる。本稿では、まず、確率的な攪乱項が入っているSIRモデルから、実効再生産数 $\mathcal{R}_t$ をカルマンフィルターで推計できる状態空間システムを導出する。推計された実効再生産数 $\mathcal{R}_t$ の変化は感染症の流行をうまく描写できると考えられる。また、感染症対策を数量的に記述できる指標として、本稿では、OxCGRTの指数及び対策インディケータを使い、時変係数回帰から感染症対策の効果を総合的に表す時変係数を推計する。さらに、推計された時変係数をステップワイズ回帰の被説明変数として、OxCGRTの対策インディケータを説明変数として、具体的にどの対策が効いているかを回帰分析で分析する。その際に、複数の説明変数の間に多重共線性が存在する可能性があり、もっとも説明力の高い説明変数の組み合わせを決定するために、ステップワイズ回帰方式を利用して、説明力の低い変数を排除することで多重共線性を回避して、回帰係数を推計する。

以上の実証分析を経て、日本において、COVID-19 に対する感染症対策が基本的に有効であることが認められるが、再三に発出された緊急事態宣言の効果が次第に衰えていることも推計された時変係数の推移から読み取られる。第 1 回から第 3 回までの緊急事態宣言が発出されたあと、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の下落、いわゆる感染拡大がある程度食い止められていたことは確認されているが、直近第 4 回の緊急事態宣言が発出されても、実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の下落が今だに見られず、感染拡大が更に深刻化することが認められる。個別な感染症対策の効果を識別するためのステップワイズ回帰から、閉鎖・隔離・規制というような政策はその効果が統計的に有意に出ているが、このような政策は国民の自由の制限をもたらし、生活に大きく影響を与え、経済活度に支障をきたすため、実施する際に慎重な判断が必要であると考えられる。実際に、図 4 に示された C1 (学校閉鎖) について、日本では、第 1 回の緊急事態宣言の際に、一律休校が要請されたが、その後、一律休校が再度要請されることがない。

ステップワイズ回帰から公共衛生関係の対策はそれほど有効ではないという結果が得られている。一部の対策、H3 (接触追跡) や H8 (高齢者に対する保護) の有効性が認められているが、H7 (ワクチン接種) の有効性が統計的に検出されていない。ワクチン接種が 2021 年 2 月ぐらいから始まって、さらに 5 月以後に接種が加速しているという事実を考慮すれば、全データ期間を使つての回帰でその有効性が検出されないことも納得できると考えられる。回帰に使うデータの期間を変更すれば、上記の結論が変わることもあり得る。また、経済支援関係の対策の有効性が確認されているため、これは「10 万円一律給付」のエビデンスとも言える発見である。

現行の行政及び法律システムでは、日本政府にとって、国民の自由の制限を伴うような感染症対策の実施は実務上、難しいし、また、7 月 23 日から始まった東京オリンピックの開催で、入国者の増加、国内の人の流れの増加が見られているため、自粛による感染症対策の効果がさらに弱くなることが予想される。これからさらに有効な感染症対策を探っていくことが求められている。最後に、本

稿の実証分析の解釈及びその政策的な含意はあくまでも本稿の実証分析の文脈においてのみなされるものであり、一般化を有するものではないと断っておく。COVID-19 に対する認識はまだ浅く、各分野の研究で日々新しい発見があり、今だに研究途上であると言える。現代社会で人類がこれほど手強い感染症と戦うことはまれであり、今得られた結論は一時的なものであり、将来的に覆されることも十分ありえると考えられる。特に、COVID-19 に対する研究は医学者、疫学者だけではなく、経済学者や社会学者もそれぞれの視点から考察が加えられている。経済学分野では、近年、DID、傾向スコアマッチングや不連続回帰といった因果関係の識別手法が発達し、これらの手法を応用して、感染症対策の効果を識別することは将来的に重要な研究テーマであると予想される。

## 図 表

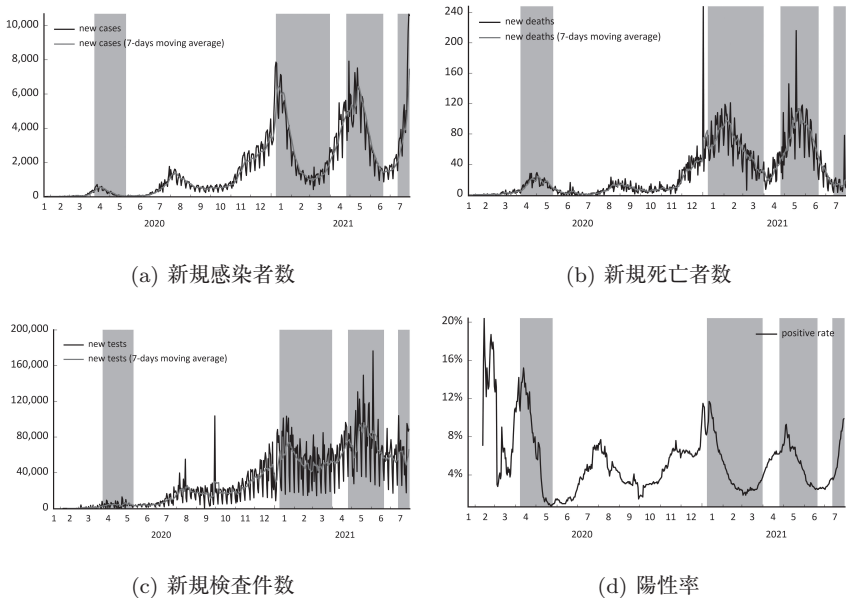


図 1: 日本における COVID-19 の状況



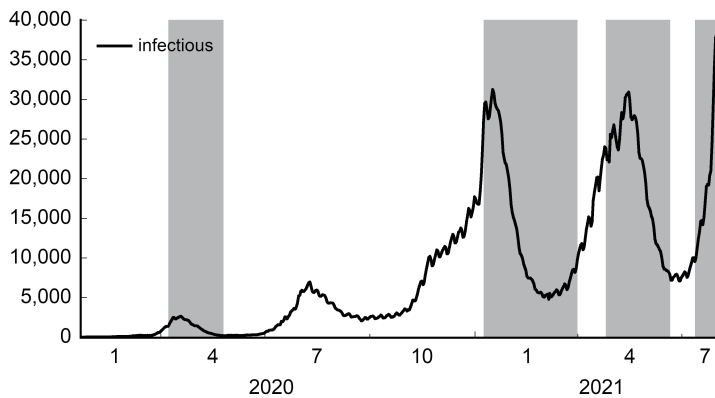


図 2: 感染者数  $I_t$  の推移 ( $\gamma^{-1} = 7$ )

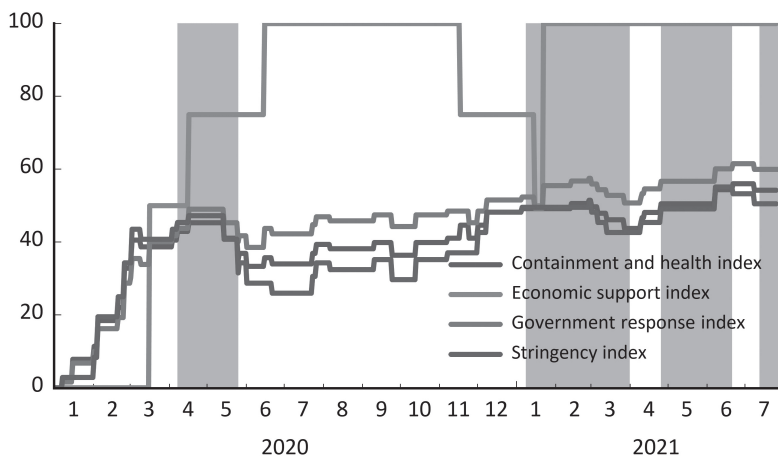


図 3: OxCGRIT の指数

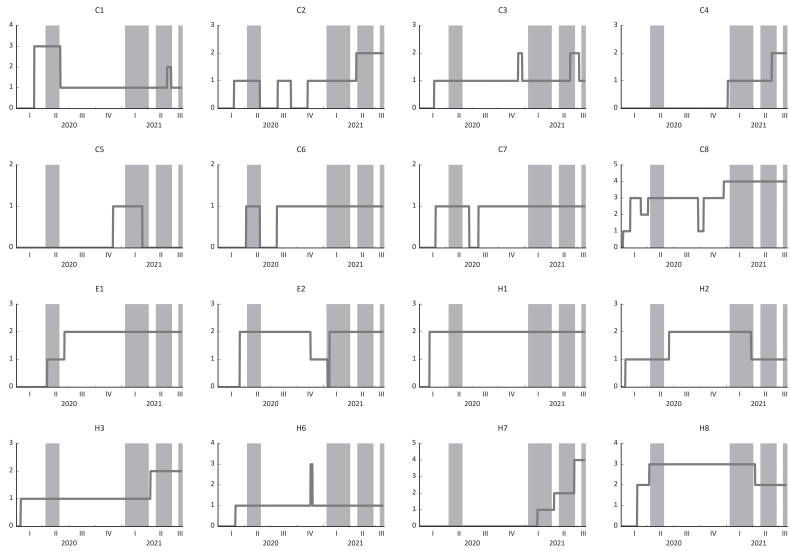


図 4: OxCGRIT の対策インディケータ

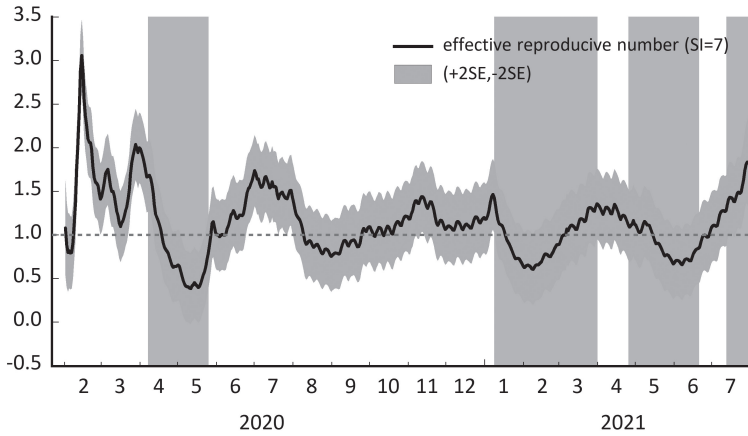


図 5: 実効再生産数  $\mathcal{R}_t$  の推計値 ( $\gamma^{-1} = 7$ )

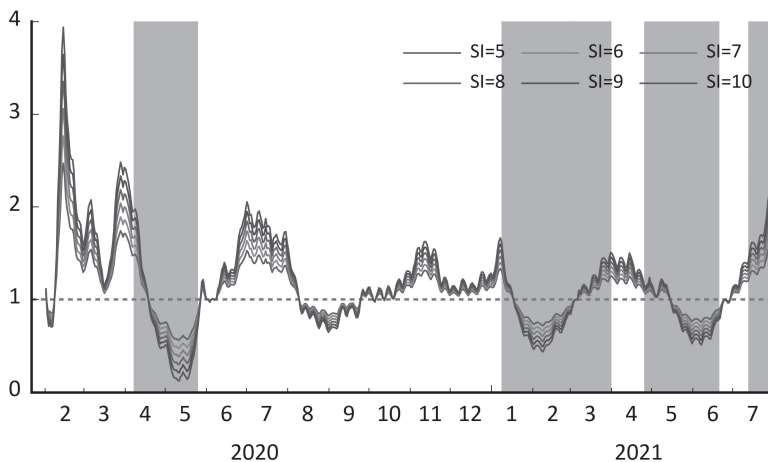


図 6: 実効再生産数  $R_t$  の推計値 ( $\gamma^{-1} = 5, 6, \dots, 9, 10$ )

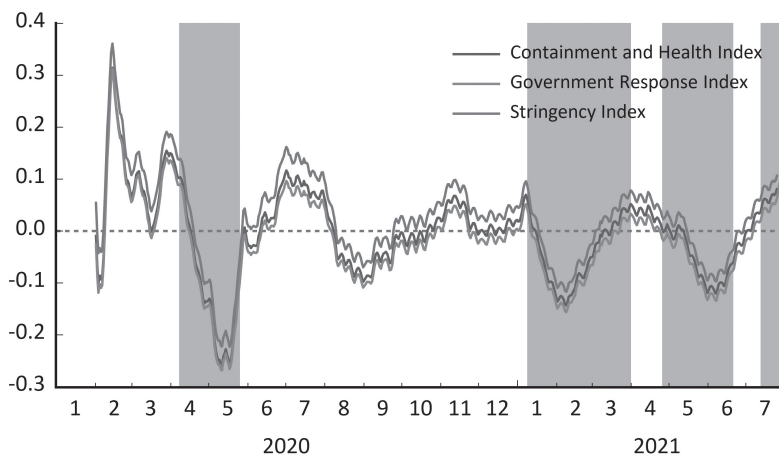


図 7: 時変係数  $\beta_{1,t}$  の推計値

ID	対策	政府反応指数	隔離と衛生指数	強度指数
C1	学校閉鎖	✓	✓	✓
C2	職場閉鎖	✓	✓	✓
C3	公共イベントのキャンセル	✓	✓	✓
C4	集会制限	✓	✓	✓
C5	公共交通規制	✓	✓	✓
C6	在宅要請	✓	✓	✓
C7	国内移動制限	✓	✓	✓
C8	国際移動コントロール	✓	✓	✓
E1	家計の収入に対する支援	✓	×	×
E2	家計の債務に対する支援	✓	×	×
E3	財政措置	×	×	×
E4	他国に対する経済援助	×	×	×
H1	公共宣伝活動	✓	✓	✓
H2	検査対策	✓	✓	×
H3	接触追跡	✓	✓	×
H4	ヘルスケアに対する緊急投資	×	×	×
H5	ワクチンに対する投資	×	×	×
H6	フェイシャルカバー	✓	✓	×
H7	ワクチン接種	✓	✓	×
H8	高齢者に対する保護	✓	✓	×

表 1: OxCGRT の指数と対策インディケータ

	平均	中央値	標準偏差	最小値	最大値	データ个数	データ範囲
強度指数	38.4	40.7	12.6	0	55.1	572 個	2020 年 1 月 1 日～2021 年 7 月 25 日
政府反応指数	45.5	47.4	13.6	0	61.5	577 個	2020 年 1 月 1 日～2021 年 7 月 30 日
隔離と衛生指数	40.7	41.1	11.8	0	56	572 個	2020 年 1 月 1 日～2021 年 7 月 25 日

表 2: OxCGRT の指数系列の記述統計

政府反応指数	-0.422**		
	(0.164)		
隔離と衛生指数		-0.492***	
		(0.185)	
強度指数			-0.413***
			(0.149)
定数項	1.693***	1.905***	1.584***
	(0.636)	(0.698)	(0.549)

表 3: 式 (9) の最小二乗推計値

変数 ID	回帰係数	標準偏差	t 値	P 値
定数項	-0.181	0.044	-4.102	0.000
C1	-0.026***	0.007	-3.945	0.000
C2	-0.012	0.008	-1.462	0.144
C4	-0.020*	0.011	-1.765	0.078
C5	-0.037***	0.011	-3.422	0.001
C6	-0.073***	0.010	-7.431	0.000
C8	0.007	0.006	1.040	0.299
E1	-0.058***	0.011	-5.398	0.000
E2	-0.024***	0.007	-3.589	0.000
H1	0.113	0.019	5.985	0.000
H2	0.085	0.013	6.510	0.000
H6	0.035	0.012	3.002	0.003
H7	0.042	0.007	5.911	0.000
H8	-0.008	0.009	-0.967	0.334

表 4: 政府反応指数に属する対策インディケータに対するステップワイス回帰

変数 ID	回帰係数	標準偏差	t 値	P 値
定数項	-0.028	0.044	-0.643	0.521
C1	-0.019***	0.005	-3.590	0.000
C4	-0.032***	0.011	-2.988	0.003
C5	-0.016	0.010	-1.615	0.107
C6	-0.097***	0.010	-9.237	0.000
C7	0.014	0.014	0.975	0.330
H1	0.111	0.020	5.618	0.000
H2	0.046	0.012	3.709	0.000
H3	-0.077***	0.017	-4.489	0.000
H6	0.039	0.012	3.291	0.001
H7	0.042	0.008	5.498	0.000
H8	-0.052***	0.008	-6.897	0.000

表 5: 隔離と衛生指数に属する対策インディケータに対するステップワイス回帰

変数 ID	回帰係数	標準偏差	t 値	P 値
定数項	0.049	0.043	1.127	0.260
C1	-0.035***	0.004	-8.077	0.000
C2	0.016	0.007	2.295	0.022
C3	-0.013	0.010	-1.346	0.179
C5	-0.016*	0.008	-1.846	0.066
C6	-0.111***	0.010	-10.997	0.000
C7	-0.019	0.015	-1.304	0.193
C8	-0.016***	0.006	-2.613	0.009
H1	0.091	0.020	4.446	0.000

表 6: 強度指数に属する対策インディケータに対するステップワイス回帰

## 【参考文献】

- [1] Kucharski, A. J., Russell, T. W., Diamond, C., Liu, Y., Edmunds, J., Funk, S., ... & Flasche, S. (2020). Early Dynamics of Transmission and Control of COVID-19: A Mathematical Modelling Study. *The Lancet Infectious Diseases*, 20(5), 553–558.
- [2] Dehning, J., Zierenberg, J., Spitzner, F. P., Wibral, M., Neto, J. P., Wilczek, M., & Priesemann, V. (2020). Inferring Change Points in the Spread of COVID-19 Reveals The Effectiveness of Interventions. *Science*, 369(6500).
- [3] Cori, A., Ferguson, N. M., Fraser, C., & Cauchemez, S. (2013). A New Framework and Software to Estimate Time-varying Reproduction Numbers during Epidemics. *American Journal of Epidemiology*, 178(9), 1505–1512.
- [4] Thompson, R. N., Stockwin, J. E., van Gaalen, R. D., Polonsky, J. A., Kamvar, Z. N., Demarsh, P. A., ... & Cori, A. (2019). Improved Inference of Time-varying Reproduction Numbers during Infectious Disease Outbreaks. *Epidemics*, 29, 100356.
- [5] Arroyo-Marioli, F., Bullano, F., Kucinkas, S., & Rondón-Moreno, C. (2021). Tracking  $\mathcal{R}$  of COVID-19: A New Real-time Estimation Using The Kalman Filter. *PLoS One*, 16(1), e0244474.
- [6] Hale, T., Petherick, A., Phillips, T., & Webster, S. (2020). Variation in Government Responses to COVID-19. Blavatnik School of Government Working Paper, 31, 2020–11.
- [7] Maier, B. F., & Brockmann, D. (2020). Effective Containment Explains Subexponential Growth in Recent Confirmed COVID-19 Cases in China. *Science*, 368(6492), 742–746.
- [8] Prem, K., Liu, Y., Russell, T. W., Kucharski, A. J., Eggo, R. M., Davies, N., ... & Klepac, P. (2020). The Effect of Control Strategies to Reduce Social Mixing on Outcomes of The COVID-19 Epidemic in Wuhan, China: A Modelling Study. *The Lancet Public Health*, 5(5), e261–e270.



- [9] Nishiura, H., Linton, N. M., & Akhmetzhanov, A. R. (2020). Serial Interval of Novel Coronavirus (COVID-19) Infections. *International Journal of Infectious Diseases*, 93, 284–286.
- [10] Kalaba, R., & Tesfatsion, L. (1989). Time-varying Linear Regression via Flexible Least Squares. *Computers & Mathematics with Applications*, 17(8–9), 1215–1245.
- [11] Derksen, S., & Keselman, H. J. (1992). Backward, Forward and Stepwise Automated Subset Selection Algorithms: Frequency of Obtaining Authentic and Noise Variables. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 45(2), 265–282.