

CIRJE-J-315

「接触8割削減」の科学的根拠の再現（再検討）

東京大学大学院経済学研究科
岩本 康志

2026年2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・複写して差し支えない。

Reproduction of Scientific Basis for “Reducing Contact by 80%” (Reappraisal)

Yasushi Iwamoto

Abstract

This paper aims to reproduce the results of the mathematical model of infectious diseases that provided the scientific basis for the “Reducing Contacts by 80%,” which was one of state of emergency measures in the spring of 2020. Since some results were successfully reproduced from publicly available information, the overall calculations were correct.

However, when examined within an SIR framework that explicitly models the mechanism generating new infections, the published figures swapped new infections and the stock of infected individuals. The figures are inconsistent with both the model deriving the damage estimates and the theoretical rationale for contact reduction as a policy instrument—namely, that reducing contact lowers the number of new infections. As a result, the analysis of countermeasures of COVID-19 lacks internal validity. While this paper does not address the real-world validity of the model, it is “incorrect” scientific advice in the sense that it lacks internal validity. To avoid similar situations in the future, it will be necessary to have a system in place to check the analysis by a larger group of experts.

「接触 8 割削減」の科学的根拠の再現（再検討）

岩本 康志

要 約

本稿では、2020 年春の緊急事態措置である「接触 8 割削減」に科学的根拠を与えた感染症数理モデルの結果を再現した。公開された情報から高い精度で再現できた分析結果があることから、全体としては正しい計算がおこなわれていると推測される。

一方で新規感染の構造を明示的に考慮した SIR モデルから見れば、新規感染者と感染者が取り違えられた図が発表されていた。これらの図は、被害想定を計算したモデルや接触削減を手段とする根拠（接触が減少すれば新規感染が減少する）と矛盾する。そのため、COVID-19 対策の分析はその内的妥当性を欠いていることになる。本稿ではモデルの現実妥当性を問わないが、内的妥当性を欠いたという意味で「正しくない」科学的助言がされたといえる。将来に同様な事態が起こらないようにするには、専門家集団の層が厚くなり、分析をチェックする体制が整備されることが必要とされるだろう。

新型インフルエンザ等緊急事態宣言の決定に至る記録については、会議録等の経過記録と科学的根拠となるデータは完全に保存し、国民への説明責任を果たすとともに、次代への教訓として活用できるようにすること

(新型インフルエンザ等対策特別措置法案に対する附帯決議
2012年4月24日 参議院内閣委員会)¹

1. 序論

本稿は、西浦博教授が2020年3月から4月にかけて公表した一連の感染症数理モデルの解説と再現をおこなう。このときには、2種類のモデルが用いられていた。1つは、人口を年齢階層で3区分し、かつ感受性の相違で3区分した年齢構造化 SIR モデルである。そのソースコードは5月末に公開された。もう1つは、区分指数モデル (piecewise exponential model) である。後者のモデルが使われたことは、2025年8月に西浦教授のインタビュー記事 (橋本 2025) が公開されるまで、一般には知られていなかった。

年齢構造化 SIR モデルは、パラメータの設定の差によって3種類のモデルに区分されることがわかった。本稿ではこれらを便宜上「モデル A」「モデル B」「モデル C」と呼ぶことにする。一方、区分指数モデルは「モデル d」と呼び、大文字と小文字でモデルの種類の違いがわかるようにする。

モデル d の分析結果は感染症専門家の接触 8 割削減の提言の根拠に利用され、安倍晋三首相の記者会見や国会答弁で引用されていた。西村康稔新型コロナウイルス感染症対策担当大臣は国会答弁で、このモデルが SIR モデルであると発言しており、これまで SIR モデルに基づくものと思われていた²。そして、匿名の市民 (煙人計画氏、sarkov28 氏)

* 本稿は、岩本(2023)の改訂版である。旧稿をもとにした岩本(2025)の出版後に新事実が判明したので、それを反映したものである。本稿の作成に当たっては、JSPS 科学研究費補助金 (基盤研究 C) 24K04922、JSPS 課題設定による先導的人文学・社会科学研究推進事業 JPJS00123812864 の助成を受けた。

¹ https://www.sangiin.go.jp/japanese/gianjoho/ketsugi/180/f063_042401.pdf

² 「緊急事態宣言を発出するときにも、西浦教授の SIR モデルに基づいて、ほっておくと爆発的な感染になる、しかし、8 割削減、接触削減ができれば一定の期間内に新規感染者の数を抑えることができる、これが 7 割ならそれが少しおくれる、こういったシナリオもお示しをしながら、これは専門家の皆さんのお立場で分析をし、発信もしていただきながら、そして、それを受けとめた政府の方でも発信をしながら対応させてきていただいております。」(2020年7月8日、衆議院内閣委員会。強調は引用者。

https://www.shugiin.go.jp/internet/itdb_kaigiroku.nsf/html/kaigiroku/0002201202007080

によって SIR モデルを用いた再現作業がおこなわれたが、感染者数が西浦教授による分析の新規感染者数に一致することが示された。そして、岩本(2023)、仲田・芳賀沼・塚原(2023)がその結果を再確認している。こうして、年齢構造化 SIR モデルから見た場合、その感染者数が区分指数モデルでの新規感染者数に対応するという関係となっている。

本稿では、以前の再現作業では明らかになっていなかった事実（区分指数モデルの使用）を踏まえて、あらためて2020年に発表された感染症数理モデルによる接触削減のシミュレーションを考察する。本稿の構成は、以下の通りである。2節では、年齢構造化 SIR モデルによるモデル A、B、C の再現作業を示す。3節では、接触 8 割削減の根拠とみなされてきたモデル d（区分指数モデル）の再現作業と年齢構造化 SIR モデルを用いたときの分析結果を示す。4節では、年齢構造化 SIR モデルをモデル d の分析対象に適用したところ、西浦教授の分析での新規感染者数が SIR モデルの感染者数によって再現されることを見る。5節では、2020 年秋に西浦教授が発表した SIR モデルと SEIR モデルによる接触削減シミュレーションの再現作業をおこなう。6節では、本稿の結論を要約する。

付録 A では、年齢構造化 SIR モデルの解説を、西浦教授が公開したソースコードに即して、おこなう。付録 B は、微分方程式の計算方法を概説する。付録 C は、本稿での再現作業の詳細を説明する。付録 D は、年齢構造化 SIR モデルの感染者数と区分指数モデルの新規感染者数がほぼ一致する理由を説明する。

[20.htm](#))

また、一ノ瀬・田・李(2020)は「厚生労働省新型コロナウイルス感染症対策専門家会議による「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」（2020 年 4 月 22 日、<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000624048.pdf>）など、関連の報道をみる限り、ここでは感染症の短期的な流行過程を決定論的に記述する古典的なモデル方程式である SIR モデル)をベースとした数理モデルが用いられているものと考えられる。」とのべており、当時の研究者の理解が示されている。

2. 再現作業の概要

西浦教授が2020年3月から4月にかけて公表した感染症数理モデルによる分析結果は、新規感染者の推移を示すグラフがメディアや新型コロナウイルス感染症対策本部新型コロナウイルス対策専門家会議（以下、専門家会議）の資料を通して公表されたが、モデルの詳細はこの時期には公表されていなかった。したがって、緊急事態宣言の発出や解除の決定をする段階では、第三者がモデルの妥当性をチェックするのは困難な状態にあった。政策担当者、専門家にも分析結果が示されていたと思われるが、詳細がどこまで示されていたかは外部からはうかがい知れない。

発表された分析結果を、発表日を基にして、3月2日資料、3月19日資料、4月3日資料、4月9日資料と呼ぶことにする。また、同年秋に西浦教授が発表した2本の解説論文がこれらの資料の性格を理解する助けとなるので、これを鈴木・西浦(2020a、2020b)として引用する。表1はこれらの資料をまとめたものであるが、それぞれがどのような内容であるのかは以下の再現作業のなかで説明する。

表1 西浦教授によるモデル

モデル	出典	用途	モデルの種類
A	3月2日資料	被害想定	年齢構造化 SIR モデル
B	3月19日資料	被害想定	年齢構造化 SIR モデル
C	4月3日資料	接触削減	SIR モデル ¹⁾
d	4月9日資料 ²⁾	接触削減	区分指数モデル ³⁾
E	鈴木・西浦(2020a)	被害想定、接触削減	基本的な SEIR モデル
F	鈴木・西浦(2020b)	被害想定、接触削減	基本的な SIR モデル

(注1) どのような種類の SIR モデルであるかは明らかではない。本稿では、年齢構造化 SIR モデルで再現する。

(注2) 資料を作成した区分指数モデルをd、年齢構造化 SIR モデルによる本稿の再現をDとする。

(注3) 区分指数モデルは、SIR モデルの具体的構造をもたない。

年齢構造化 SIR モデルを数値計算するソースコード（微分方程式を数値計算で解くプログラム言語である Berkeley Madonna で書かれている）が GitHub で公開されたのは、5月27日である。ただし、発表された結果をそのまま生成するコードではなく、モデルの骨子だけであり、第三者が結果を再現するためには、コードを補わなければいけない。また、西浦教授の文章による解説が『ニューズウィーク日本語版』誌6月9日号（6月2日発売）に掲載された（西浦 2020b）。付録 A では、これらの資料をもとに、年齢構造化 SIR モデルの内容をくわしく解説している。

年齢構造化 SIR モデルによる再現作業は、ソースコードと解説に基づいて再現できるものを対象とし、公開されていないパラメータを必要とするものは原則として対象外とする。これによって、新規感染者、累積感染者、累積重症者、累積死亡者が対象となり、発症者、入院者、重篤患者は対象外となる³。一方、鈴木・西浦(2020a、2020b)の再現作業は、新規感染者数を対象とする。一部のパラメータは公表されていないが、sarkov28氏が補ったパラメータの設定にしたがう。

再現作業は、微分方程式の数値計算方法であるルンゲ=クッタ法 (Berkeley Madonna のデフォルトの方法) を R を用いておこなった⁴。コードは GitHub で公開しており、誰でもダウンロードして利用可能である。数値計算の方法については付録 B で概説し、コードの内容については付録 C で解説する。

³ 付録 C で説明する再現作業には、いくつかの例外が含まれている。

⁴ 岩本(2023)では、同様の作業を VBA (Visual Basic for Applications) で実装した Excel ファイルでおこなった。詳細は岩本(2023、付録 C)で説明されている。

3. 年齢構造化 SIR モデルの再現

3月2日、3月19日、4月3日資料を年齢構造化 SIR モデルによって再現すると、パラメータの設定の違う 3 種類のモデルから生まれたものであることが以下の分析からわかる。そこで、それらを時系列順にモデル A (3月2日資料)、モデル B (3月19日資料)、モデル C (4月3日資料) とここでは呼ぶことにする。モデル A とモデル B は、被害想定 (流行最終規模、EFS、epidemic final size) を計算するために用いられたが、モデル C は接触削減のシミュレーションに用いられた。

3.1 3月19日資料 (モデル B)

専門家会議 (第 8 回) の「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言 (3月19日)」では新規感染者の詳細な数値が公開されているので、これを再現作業の出発点とする⁵。後述する理由から、これは 3 種類のうちのモデル B に相当する。

この資料の図 6 は、基本再生産数を 2.5 と置いたときの新規感染者数と重篤患者数を示している。資料の本文には下線つきで、日本のある特定地域 (10 万人) が「流行 50 日目には 1 日の新規感染者数が 5,414 人にのぼり、最終的に人口の 79.9% が感染すると考えられます。」と詳細な数値が示されている。本稿の再現作業では、50 日の新規感染者数は 5,414 人とすべての桁が一致して再現できた。また、最終的な感染規模の 79.9% も再現できた⁶。

3.2 4月15日資料 (モデル B)

西浦教授は 4月15日におこなった記者会見で、死亡者数の推計を発表した。西浦教授が作成した資料は公開されていないが、数値の詳細がわかる報道では、

「外出自粛要請などの対策を全く取らなかった場合、重篤患者数は 15~64 歳が約 20 万 1300 人、65 歳以上の高齢者が約 65 万 2000 人で計 85 万 3300 人となった。

試算では対策をしなかった場合、重篤患者の 49% が死亡すると予測。西浦教授は死者数を出していないが、単純計算で約 41 万 8000 人が亡くなることになる。」(日本経済新聞)

7

⁵ 「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言 (3月19日)」(新型コロナウイルス対策専門家会議)

<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000610566.pdf>

⁶ なお、同時に示されている重篤患者数は本稿の再現対象外であるが、本文では「呼吸管理・全身管理を要する重篤患者数が流行 62 日目には 1,096 人に上り」と書かれているが、図とはまったく数値が合わないため、文章と図は違ったモデルに由来する可能性がある。

⁷ 「「対策ゼロなら 40 万人死亡」 厚労省クラスター対策班」(日本経済新聞、2020 年 4 月

「人工呼吸器や集中治療室（ICU）での治療が必要となる重篤患者は15～64歳で20万1301人で、65歳以上は65万2066人と見積もった。致死率を成人0.15%、高齢者1%と想定すると、死亡者は重篤患者の半数（49%）で、約42万人の予測になる」（毎日新聞）⁸。

とある。

西浦・川端(2020)によれば、死亡者数の公表については、発表しようとする西浦教授とこれを止めようとする厚生労働省の間のせめぎ合いがあった。結局、重篤患者数が公表され、これと重篤患者数の死亡率が言及されることで、間接的に死亡者数が計算されるようになった⁹。

再現した流行最終規模に公表されている致死率を乗じて死亡者数を再現すると、42万6,684人となって、このとき報道された41.8万人とは合わない。公表値とわずかに違う致死率が用いられているのか、その他で違いが生じているかわからないが、3月19日資料と同じモデルBに分類しておく¹⁰。

15日) <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO58067590V10C20A4CE0000/>

⁸ 「新型コロナ 対策なければ重篤85万人 専門家試算、国内42万人死亡」（毎日新聞、2020年4月16日）

⁹ 「実は42万人という数は、僕の口からは言っていないんです。前日に医務技監から電話がかかってきて、（中略）『どっちしても死亡者数は直接言わないでください』と言われました。『じゃあ、85万人重症でその約半分が死亡』ならいいんですかと聞きますと、『それならよい』ということでした。そんな経緯もあって、本当に回りくどい表現しかしていないのです。」（西浦・川端、2020、181-182頁）

¹⁰ 西浦教授は3月19日資料について、「実は、これが後々、なにも対策をしないと累計で85万人の重症者が出て、そのうちの半分近くが死亡すると42万人だという推定のベースになります。この図を出した時のシミュレーションから簡単に計算できるものなんですけれど、死亡者数に関しては絶対に言わないということを、ここでは約束させられます。」（西浦・川端、2020、110頁）

¹¹ なお、重篤化率（感染者当たりの重篤患者数）を小児0%、成人0.3%、高齢者2%と置くと成人20,1301人、高齢者65,2066人の重篤患者数を正確に再現できることをsarkov28氏が示している（「手元の42万人死亡推計の数値計算が、西浦氏の数字に一致するようになった事情 - 気になったことを考察する」<https://sarkov28.hatenablog.com/entry/2021/07/08/171933>）。本稿でもこれを再現できる。ただし、これは公表された重篤患者数を導く重篤化率を逆算しただけであり、西浦教授が重篤化率をこのように切りのいい数値に置いたのかは不明である。また、かりにこの重篤化率の設定では重篤患者の致死率は50%となり、報道された49%より若干高くなる。

3.3 3月2日資料（モデルA）

持ち回りで開催された専門家会議（第5回）の資料「新型コロナウイルス感染症の流行シナリオ（2月29日時点）」は、日本医療研究開発機構感染症実用化研究事業（新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発推進研究事業）「感染症対策に資する数理モデル研究の体制構築と実装」（研究開発代表者：西浦博）の報告書である（西浦、2020a）¹²。分析の主たる目的は、冒頭で「本シナリオは、各都道府県において、今後の対策を検討するにあたり地域内の流行状況や年齢構成等の地域性を十分に踏まえて医療体制の整備を行う際の参考にしていただくため、現時点での情報に基づいて示すものである」とされている。日本医師会総合政策研究機構はこのシナリオに基づくピーク時の患者数と各種病床数が都道府県別に示された資料（高橋・江口・石川、2020）を作成しており、COVID-19対策での病床整備の根拠資料として重要なものである。

3月2日資料はモデルの構成に必要な解説に乏しく、本稿での再現の対象外とする。しかし、モデルBを再現したパラメータをもとに累積感染者を推計すると、その年齢階層別の分布は公表された発症者の分布と大きく異なる。再現対象となる変数は存在しないものの、モデルBとはパラメータが違っていることが推測される。時系列でモデルBに先行しており、結果の差が大きいことから、これをモデルAと呼ぶことにする。

3.4 4月3日資料（モデルC）

接触8割削減による新規感染者のシミュレーションは、4月3日に日本経済新聞、NHKの記事に掲載された¹³。3月2日資料、3月19日資料は10万人当たり人数であったが、このシミュレーションは、実人数で表示されている。また、この資料では年齢階層で区分されていないので、年齢構造化SIRモデルが使われたどうかは定かでないが、ここではモデルBを再現したモデルによって再現を試みた。ところが、公表されているパラメータでは発表されたグラフよりも大きな数値となってしまう。煙人計画氏、Sarkov28氏は感染者数の初期値を10分の1（1人）にすることでよく再現されることを示しており、本稿でもこれにしたがった。図1は、日本経済新聞社に掲載された図と本稿の再現結果を比較したものである。記事には詳細な数値がないため、グラフでの比較によるしかないが、再現でき

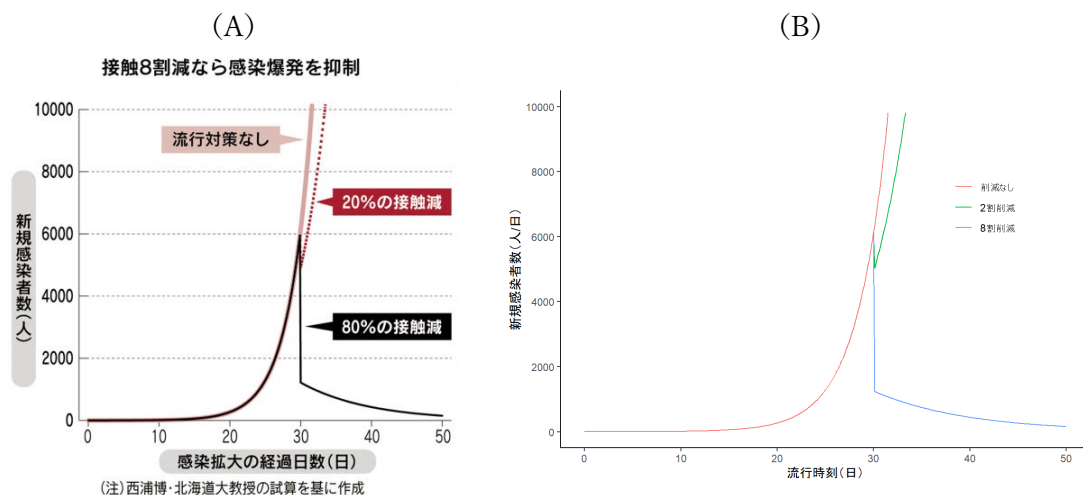
¹² 「新型コロナウイルス感染症の流行シナリオ（2月29日時点）」（新型コロナウイルス対策専門家会議（第5回）資料、2020年3月2日）

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/novel_coronavirus/senmonkakaigi/sidai_r020302.pdf

¹³ 河合(2020、122頁)によれば、前日の4月2日の専門家会議の打ち合わせで、議論になり、同席した和田耕治教授の発案で、翌3日に日本経済新聞社とNHKの取材を受けて、この資料が発表されることになった。そして、西浦教授は4月4日に、専門家有志の会Twitterアカウントで直接、この図の内容を説明している（<https://x.com/ClusterJapan/status/1246314012389675009>）。

ていると考えられる。モデル B からパラメータが変更されていることから、この資料の基になるモデルをモデル C と呼ぶことにする。

図 1 4月3日資料（接触8割削減のシミュレーション）の再現



(出所) (A) 「欧米に近い外出制限を」 西浦博教授が感染者試算: 日本経済新聞

<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO57610560T00C20A4MM0000>

(B) 筆者計算

図 1 では、接触が 8 割削減されたときに新規感染者数は急速に低下している。これは、SIR モデルでは新規感染者数と接触数が比例するため、各年齢階層の接触が一律 8 割削減されれば、新規感染も同時に一律 8 割削減され、全体で 8 割削減されるためである。

この資料は緊急事態宣言発出の直前に発表されたものであるが、緊急事態宣言発出時の接触 8 割削減の根拠となるのは、この後に発表された 4 月 9 日資料になる。その意味でこれら資料は重要であるが、SIR モデルが 4 月 9 日資料を再現できないことが大きな問題をはらむので、節をあらためて検討する。

4. 年齢構造化 SIR モデルによる区分指数モデルの再現 (モデル D)

4.1 4月9日資料 (モデル d)

4月9日に公開された「東京動画」(東京都公式動画チャンネル)で、西浦教授は接触8割削減について解説している¹⁴。この動画では、2つの図が使用されている。これらは横軸と縦軸の範囲が同じであり、姉妹図と言える。最初の図(以下、4月9日資料A)は8割削減と6.5割削減を比較しており、4月22日の専門家会議資料に掲載された図につながる。もう一つの図(以下、4月9日資料B)は8割削減、7割削減、段階的削減(4割、6割、8割)の3つの選択肢を比較したものである。4月9日資料Bはその後、4月11日の日本経済新聞に掲載され、同様の図が専門家有志の会のTwitter(現X)アカウントで4月15日にツイートされている¹⁵¹⁶。これらの関連する図は、岩本(2026)で解説されている。

図2(A)は、専門家有志の会のTwitterアカウントこの資料に示された図である(4月9日資料Bに相当)。接触削減開始のタイミングが図1では30日目であったのがこの図では20日目になっているが¹⁷、それ以外にも重要な違いがある。まず、接触削減前の数値がかなり異なっている。図2(A)の20日目は500人強となっているが、図1ではそれよりも相当低い(筆者の再現では270人)。

図2 接触8割削減のシミュレーション (4月9日B資料)

(A)

(B)

¹⁴ <https://youtu.be/dUIdT4gcDLo>。この動画はライブ配信であるので、4月9日収録と推定する(https://x.com/tocho_koho/status/1248156945770397696)。現在、非公開となっているが、文字起こし記録がインターネットアーカイブにある(<https://web.archive.org/web/20200410155042/https://tokyodouga.jp/duidt4gcdlo.html>)。

また、kyo_twit氏が公文書開示請求(5政戦広第1611号)で動画を入手しており、一連のファイルが、Googleドライブに格納されている。

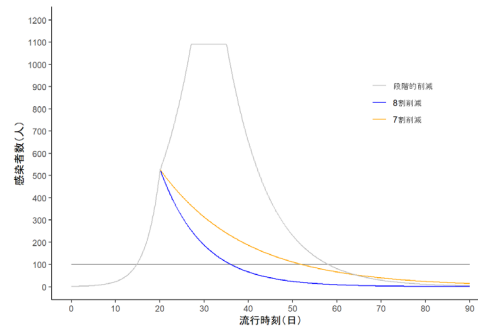
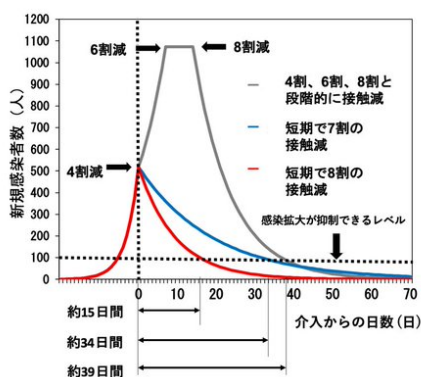
https://drive.google.com/drive/folders/1-6yF2JkFR74nT-3FI6iq3HQoWvLrYVxt?usp=drive_link

¹⁵ (A)と同じ図は、新型コロナクラスター対策専門家Twitterアカウントに投稿された。

<https://x.com/ClusterJapan/status/1250364311144296454>

¹⁶ 注意しなければいけないのは、4月15日の記者会見で発表された死亡者数はモデルBに基づくものであり、同日の専門家有志の会のツイートはモデルCに基づくものである。

¹⁷ 接触削減開始日が20日であることは4月11日の日本経済新聞に掲載された図から確認できる。



(出所) (A) <https://x.com/ClusterJapan/status/1250639295674634240>

(B) 筆者計算 (新規感染者ではない)。色は4月9日資料Bに合わせた。

他に定性的な大きな違いとして、図1では接触削減と同時に大きく新規感染者数が減少しているのに対して、図2(A)の8割削減の場合では新規感染者が緩やかに減少している。したがって、このグラフは年齢構造化SIRモデルとはまったく違う動きをしている。

sarkov28氏、仲田・芳賀沼・塚原(2023)は、モデルBに基づいて4月9日資料の再現を試みた。すると、図2(A)の新規感染者数(感染者ストックへの流入フロー)の動きは、感染者数(ストック)の動きとして、図1(A)と同じパラメータによって再現できることが示された。本稿でも、同様の作業をした結果が図2(B)であり、図2(A)を再現できている。年齢構造化SIRモデルから見ると、変数の取り違えが生じている分析結果が示されている。

しかし、このグラフの公開から5年を経過した2025年8月の西浦教授へのインタビュー(橋本2025)によって、実際には別のモデルによって計算されたことが、一般に向けて明らかになった¹⁸。また、モデルのパラメータも同時に公開された。別のモデルとは、接触削減割合の変化前後に新規感染者数が別々の指数関数にしたがうモデルである。このようなモデルは、生存分析(survival analysis)で「区分指数モデル」としてよく知られているので、ここではこの用語を借用する。分析期間をいくつかに区切って、それぞれの区間で指数曲線を描くことを表した命名である。西浦教授はインタビューで、これを「区間定数を用いた指数関数モデル」と呼んでいる。

感染者がほとんどいない流行初期には、年齢構造化SIRモデルの新規感染者数と感染者数は指数関数的に変化する。そのため、区間のなかの新規感染者数の変化率は2つのモデ

¹⁸ 正確に言うと、2020年4月15日の記者会見には、このことは説明されたということであるが、メディアはこれを報道しなかった。西浦教授がインタビューで「それはしばらくの間はフルの動画で、メディア(例えばThe PAGE)でアップロードされていたかと思えます。」とのべているのは正しくない。

ルで高い精度で一致するように構成できる。しかし、区間の境界（接触削減を始めた瞬間）が大きく食い違う。これが、上でのべた4月3日資料と4月9日資料の違いである。

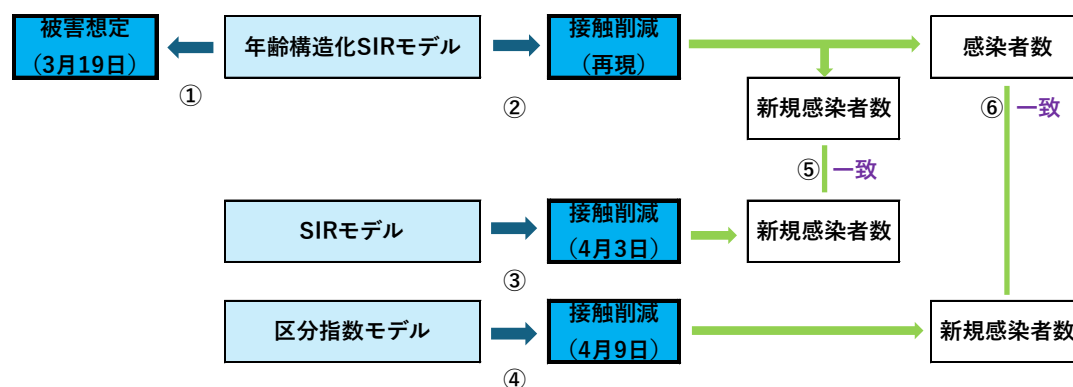
西浦教授は区間の境界で新規感染者数が不連続な動きをしないとしているため、区分指数モデルでの「新規感染者数」の動きは年齢構造化 SIR モデルでの「感染者数」の動きと高い精度で一致するようになる。そのことは、以下のように数値的に確かめられる（付録 D は、その理論的な理由を説明している）。計算は、GitHub で公開したファイル（https://github.com/iwmtys/covid/blob/master/COVID_Exp_2020.xlsx）の「Result」シートにまとめられている。基本再生産数は2.5、平均世代時間は4.8日としている。区分指数モデルの新規感染者数と年齢構造化 SIR モデルの感染者数の初期値はどちらも1と設定し、接触削減は20日目に開始する。20日と90日の数値を区分指数モデル、年齢構造化 SIR モデルの順にならべると、

20日目の尖端は、518.0128 518.0062

90日目は、13.51995 13.51715

となり、最初の4桁が一致する。以上のことから、上述の資料とそれを導いたモデルの関係は、図3のようになる。

図3 SIRモデルと区分指数モデルの関係



- ①年齢構造化SIRモデルは「被害想定（42万人死亡）」のもとになる。
- ②年齢構造化SIRモデルで接触削減のシミュレーションを再現する。
- ③SIRモデルは4月3日発表の「接触削減」のもとになる。「被害想定（42万人死亡）」モデルと同一かは不明
- ④区分指数モデルは4月9日発表の「接触削減」のもとになる。
- ⑤再現された新規感染者は、4月3日発表の新規感染者のグラフと一致する。
- ⑥しかし、4月9日発表の新規感染者のグラフと一致するのは、再現された感染者数である。

区分指数モデルにおいて、区間の境界で新規感染者が連続的に動くことは必須ではない。区分指数モデルは新規感染が発生する構造を定式化していない現象論的（phenomenal）なモデルであるため、新規感染者数の動きの記述に自由度がある。そのため、区分指数モデ

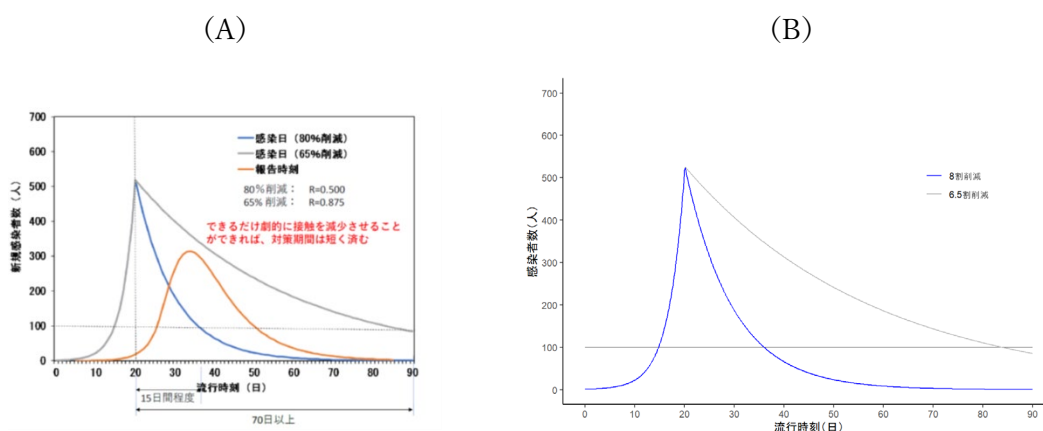
ルにおいては SIR モデルと整合的になるように、新規感染者数が不連続に動くモデルを考
えることもできる。つまり、区分指数モデル内で SIR モデルと整合的なモデルと SIR モデ
ルと矛盾するモデルの両方を考えることができる。そして、4 月 9 日資料ではあえて矛盾
するモデルが選択されていることになる。

4.2 4 月 22 日資料 (モデル d)

4 月 9 日資料 A の縮尺を変更した図が、4 月 22 日の専門家会議の「新型コロナウイルス
感染症対策の状況分析・提言」に掲載されている。ここでは内容の不正確さが増している
ため、あらためて取り上げる。この資料は、会議時に配布された案¹⁹と会議後に発表され
た決定稿²⁰の 2 つが公開されていて、両者に若干の差がある。そこで、案を 4 月 22 日資料
A、決定稿を 4 月 22 日資料 B と呼ぶことにする。

図 4 (A) は、案 (4 月 22 日資料 A) の図を示したものである。この図には、「流行対策
開始前までは $R_0=2.5$ で感染者数が増加する。感染日別の新規感染者数は 80% の接触削減
により 15 日間で 1 日 100 人まで減少する (青線)。しかし、接触の削減が 70% であると 1
日 100 人に達するには 70 日以上を要する (灰色線)」との説明がつけられている。

図 4 接触 8 割削減のシミュレーション (4 月 22 日資料 A)



(出所) (A) 「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」(案) (新型コロナウイルス感染症対策専門家会議、2020 年 4 月 22 日)

¹⁹ 「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」(案) (新型コロナウイルス感染症対策専門家会議、2020 年 4 月 22 日)

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/novel_coronavirus/senmonkakaigi/sidai_r020422.pdf

²⁰ 「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」(新型コロナウイルス感染症対策専門家会議、2020 年 4 月 22 日)

<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000624048.pdf>

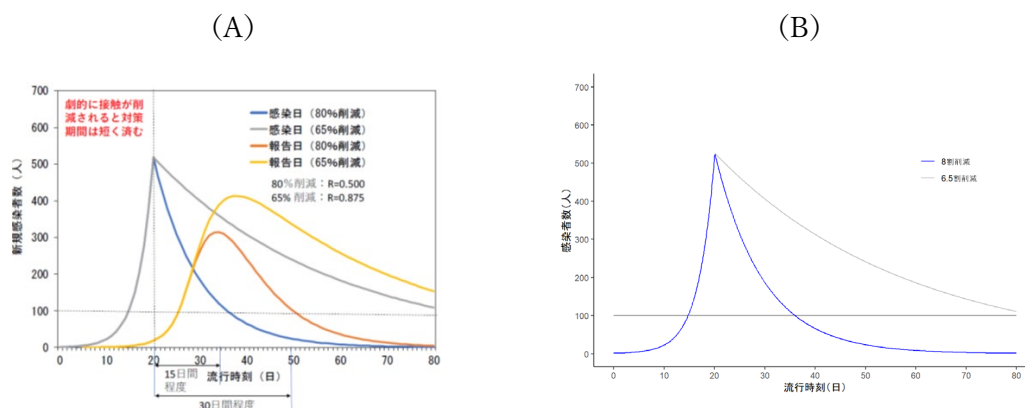
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/novel_coronavirus/senmonkakaigi/sidai_r020422.pdf

(B) 筆者計算による感染者数（新規感染者数ではない）

説明文では、1日100人に達するまでの時間が8割削減と7割削減では55日以上差があることになっている。しかし、この説明文には2つの問題点がある。第1に、図では8割削減と6.5割削減を比較しており、8割削減と7割削減の比較ではない。第2に、図では70日以前に100人に達しており、70日以上かかっていない。さらに、図にも問題があり、1人100人を示す線は水平ではなく、6.5割削減で100人に達する日が実際よりも遠くにあるように書かれている。図4(B)は本稿での感染者数の再現であるが、100人の水準での水平線が示されており、線を横切る日付が(A)よりも早いことがわかる。

図5(A)は、決定稿(4月22日資料B)の図であり、(B)は再現での感染者数である。

図5 接触8割削減のシミュレーション(4月22日資料B)



(出所) (A)「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」(新型コロナウイルス感染症対策専門家会議、2020年4月22日)

<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000624048.pdf>

(B) 筆者計算による感染者数（新規感染者数ではない）

この資料の説明文は、「流行対策開始前までは $R_0=2.5$ で感染者数が増加する。感染日別の新規感染者数は80%の接触削減により15日間で1日100人まで減少する(青線)。しかし、接触の削減が65%であると1日100人に達するには90日以上を要する(灰色線)。」となっている。灰色線の説明に2箇所の変更がある。第1は、7割削減を6.5割削減に修正したことである。第2は、接触削減開始から70日ではなく、モデルの計算の最初から90日以上としたことである。また、図の表示期間が90日間から80日間に変更された。もしこの変更が悪意がないとすれば、図は7割削減ではなく6.5割削減であったことに気づいたが、図で90日以前に100人に達しているとは気づかなかった、しかし90日以前に100人に達していることは図からはわからないようにした、ということになる。

さらに図の変更によって、この説明文の「90 日以上を要する」というのが、モデルの計算開始からなのか、接触削減開始なのかがわからなくなった。このため、接触削減開始から 90 日以上かかる、というように誤って解釈してしまう可能性がある。すなわち、8 割削減と 6.5 割削減の差が正しい比較よりも 20 日大きく、75 日以上とする誤解を招くおそれがあるということである²¹。実際、この誤解に基づいて、安倍首相が 4 月 29 日の予算委員会で以下のように答弁してしまっている。

「また、8 割の低減に満たなかった場合については、4 月 22 日の専門家会議の提言において、1 日当たりの新規感染者数が 500 から 100 までに減少する時間について、接触削減が 80%であれば 15 日間要するところ、65%であれば 90 日以上を要するということが示されているところでございます。」²²

4.3 区分指数モデル使用の性格と影響

接触削減のシミュレーションで区分指数モデルではなく年齢構造化 SIR モデルを用いていたとしたら政策過程にどのような影響も与えていたかをみるために、図 6 (A) は図 2 (B) を導いたモデルの新規感染者の動きを示したものであるが、図 2 とはまったく違った動きとなる。新規感染者が約 500 人の水準から対策を開始するように、削減開始日を 22 日としている（正確には、開始時点の新規感染者は 504 人である）。このとき新規感染者を 100 人に下げることが 8 割削減では接触削減開始当日に達成される一方で、7 割削減の場合には瞬時には達成されずに、8 日を要する（29 日に達成される）。つまり、19 日と説明されていたものが、8 日に短縮される²³。しかし、2 週間の報告遅れを見込んだとしても、7 割削減でも 1 か月以内に達成される。

図 6 年齢構造化 SIR モデルによる新規感染者数のシミュレーション（4 月 9 日資料）

²¹ このような誤解を招く表現は、この資料の公開に先立つ 4 月 10 日の西浦教授のインタビューでの発言に見られる。

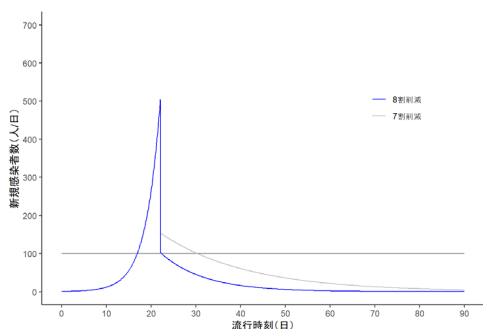
「80%だったら診断されていない人も含めて感染者が 100 人まで戻るまでは 15 日間、それに感染から発病、診断など目に見えるまでの時間が 15 日加わり、1 か月間だという話をしました。

それが、もし 65 パーセントだったら、感染者の数が減るまでに 90 日かかります。90 日プラス 15 で 105 日かかるんです。あまりにも長くかかる。」（「このままでは 8 割減できない」「8 割おじさん」こと西浦博教授が、コロナ拡大阻止でこの数字にこだわる理由 <https://www.buzzfeed.com/jp/naokoiwanaga/covid-19-nishiura>)

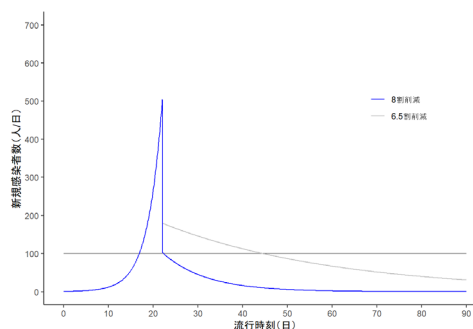
²² <https://kokkai.ndl.go.jp/txt/120115261X01720200429/291>

²³ 8 割削減では瞬時に達成されることから 0 日目に達成として、7 割削減での 8 日目の達成との差を 8 日間としている。

(A) 4月9日資料 B の修正



(B) 4月9日資料 A の修正



(注) (A) 感染日別の新規感染者数は80%の接触削減により直ちに1日100人まで減少する(青線)。しかし、接触の削減が70%であるとするとも1日100人に達するには8日を要する(灰色線)。

(B) 接触の削減が65%であるとするとも1日100人に達するには21日を要する(灰色線)。

4月9日資料で強調されていた、接触7割削減では新規感染者減少に1か月以上の長い時間がかかるという内容は、数理モデルの根拠がないことになる。

図6(B)は、年齢構造化SIRモデルによって、8割削減と6.5割削減の新規感染者数を比較したものである。図6(A)と同じ理由で、接触削減開始時を22日としている。6.5割削減の場合に新規感染者が100人を切るのは削減開始から22日目であり、8割削減との差は専門家会議資料の説明よりはるかに短くなる。

5. SIR モデル、SEIR モデルの再現

5.1 鈴木・西浦(2020a) (モデル E)

西浦教授は 2020 年の秋に発表した医学者、医療関係者に向けた数理モデルの解説論文 (鈴木・西浦 2020a、2020b) のなかで、SIR モデルと SEIR モデルを用いて接触削減のシミュレーションを紹介している。この論文での接触削減は流行がかなり進行した状態から始まるため、区分指数モデルを用いることは適さず、SIR モデルないし SEIR モデルを用いるのが適切である²⁴。

SEIR モデルを用いた鈴木・西浦(2020a)の分析結果は、sarkov28 氏によって再現作業がなされて、新規感染者数と感染者数が取り違えられていることが指摘されている²⁵。感染者数の初期値と感染性待機時間 (latent period)²⁶が論文に明記されていないため、sarkov28 氏は、感染者の初期値 1 人、感染性待機時間を 5 日と置いて、論文の新規感染者数とした図が感染者数として再現されることを示している。付録 C は、sarkov28 氏のパラメータ設定を用いた筆者の再現作業を示している。

新規感染者と感染者の混同はシミュレーションのみならず、本文でも生じている。2277 頁左欄の(2)式の直後の「新規感染者が増加している場合は」の箇所は新規感染者ではなく、感染者であることが論文の(2)式から明白であり、その後の文章と図に登場する新規感染者をすべて感染者と置き換えることで、論文は整合的になる。つまり、この箇所以降、この論文では本文と図を合わせて新規感染者と感染者が取り違えられている。

5.2 鈴木・西浦(2020b) (モデル F)

もう 1 つの鈴木・西浦(2020b)では、SIR モデルによるシミュレーションが示されているが、この論文でも鈴木・西浦(2020a)と同様に、198 頁中欄以降、感染者であるべきものがすべて新規感染者と書かれている。

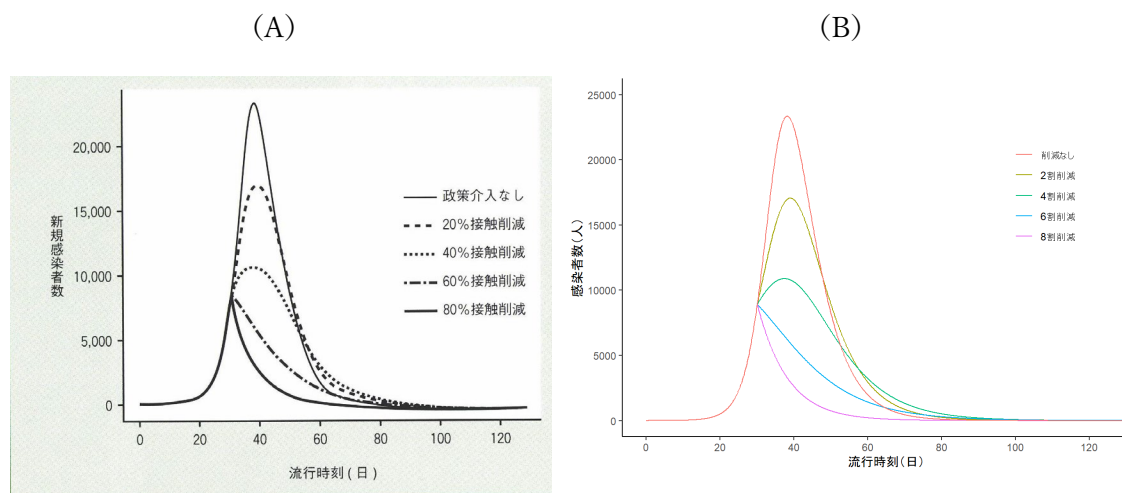
²⁴ 西浦教授は 4 月 9 日資料で区分指数モデルを使用した理由を、「接触削減では感受性宿主が十分に減る前から対策をして流行自体を抑える訳です。対策の政策シナリオを検討する際に用いるべき数理モデルでは、流行規模が小さい中で実効再生産数 (Rt) を対策に応じて柔軟に変化させることが求められるため、自ずと SIR とはアプローチが異なることになります。」(橋本 2025) と説明しているが、鈴木・西浦(2020a、2020b)はこの説明に反している。

²⁵ 「西浦氏の 2020-11 日本内科学会論文のグラフの再現と、正しいグラフの描画」
https://colab.research.google.com/drive/1MznAf_DXalsznXbALcx19CAff2gF38dC?usp=drive_link

²⁶ 感染性待機時間は、感染してから感染性を持つまでの時間である。付録 C では、数式を用いて定義している。

図 7 (A) は、鈴木・西浦(2020b)の「図 5」である。本稿で引用する論文と本稿の図が混同しやすいので、引用する論文の図を指すときは、「図 5」のように括弧をつけることにする。図 7 (B) は、論文に報告されたパラメータから感染者数を再現したものであり、「図 5」の新規感染者数を再現していることから、新規感染者と感染者が取り違えられていることがわかる²⁷。

図 7 接触削減のシミュレーション (鈴木・西浦 2020b)



(出所) (A) 鈴木・西浦(2020b、図 5)

(B) 筆者計算による感染者数 (新規感染者数ではない)

鈴木・西浦(2020b)に示された図は同年 4 月に公表された分析 (モデル d) と整合的な動きをしている。すなわち、新規感染者数は接触削減が始まった段階で不連続に垂直降下するのではなく、連続的に動いている。SIR モデルでは、これは変数の取り違いによって生じている。西浦教授は区別指数モデルで変数の取り違いは起こっていないと主張しているが (橋本 2025)、モデルの中で取り違いが発生したのではなくて、モデル自体が変数を取り違えていると言える。

²⁷ なお、「図 4」は論文の説明とはまったく異なるものが混入していることが考えられる。

「図 4」の縦軸も新規感染者数と記されているが、横軸の縮尺が「図 5」と合わない。「図 4」の $R_0 = 2.5$ は、「図 5」の接触削減なしと同じものになるはずだが、その数値はまったく異なっている。

「図 4」の横軸は鈴木・西浦(2020a)での図の軸と共通しているため、鈴木・西浦(2020a)と同じパラメータで再現すると、「図 4」に近いものが再現される。

6. 結論

本稿では、2020年春の緊急事態措置である「接触8割削減」に数量的根拠を与えた感染症数理モデルの分析結果を再現した。公開された情報から高い精度で再現できた分析結果があることから、全体としては正しい計算がおこなわれていると推測される。しかし、再現できない分析結果もあり、モデルのパラメータが変更されていると推測され、その情報が適時に公開されていれば、より透明性が高まったであろう。

一方で新規感染の構造を明示的に考慮した SIR モデルから見れば、新規感染者と感染者が取り違えられた図が発表されていた。これらの図は、被害想定を計算したモデルや接触削減を手段とする根拠（接触が減少すれば新規感染が減少する）と矛盾する。当時に年齢構造化 SIR モデルを用いて接触削減を分析していれば、そのような矛盾は起こらなかった。接触と新規感染の関係を考慮したモデルから見れば、新規感染者数と感染者数が取り違えられたため、分析の内的妥当性を欠いていることになる。本稿ではモデルの現実妥当性を問わないが、内的妥当性を欠いたという意味で「正しくない」科学的助言がされたといえる。その影響については、別稿（岩本 2026）で論じている。

分析結果が政策担当者に示される前にこの変数の取り違えが広く知られていれば、対策の根拠が全体として矛盾がなくなるように分析結果が修正される可能性があった。しかし、西浦教授のチーム以外の専門家が同時に検討するような体制はとられていなかった。将来に同様な事態が起こらないようにするには、専門家集団の層が厚くなりチェック体制が整備されることと、分析の情報が公開されて多くの人の目に触れるようにしておくことが必要とされるだろう。

参考文献

- Cash J. R., and Alan H. Karp (1990), "A variable order Runge-Kutta method for initial value problems with rapidly varying right-hand sides," *ACM Transactions on Mathematical Software*, Vol. 16, Issue 301, September, pp 201–222.
<https://doi.org/10.1145/79505.79507>
- Dormand, J. R. and P. J. Prince (1980), "A family of embedded Runge–Kutta formulae," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 6, Issue 1, March, pp. 19–26.
[https://doi.org/10.1016/0771-050X\(80\)90013-3](https://doi.org/10.1016/0771-050X(80)90013-3)
- Gupte, P., R. Eggo, and E. van Leeuwen (2025), epidemics: Composable Epidemic Scenario Modelling. R package version 0.4.0.9000, <https://github.com/epiverse-trace/epidemics>.
- 橋本紀子(2025)「緊急事態宣言「8割接触削減」の計算過程、改めてご説明します- 西浦博・京都大学大学院教授に聞く」医療維新 (2025年8月26日)。
<https://www.m3.com/news/open/iryoshin/1292682>
- 一ノ瀬俊明・田丹鶴・李一峰(2020)「時空間ランダムウォークモデルによる感染対策の検証」Center for Social and Environmental Systems Research, NIES, Discussion Paper 2020-02. https://www.nies.go.jp/social/publications/dp/pdf/2020_02.pdf
- 岩本康志(2023)「『接触8割削減』の科学的根拠の再現」CIRJE Discussion Paper CIRJE-J-307. <https://www.cirje.e.u-tokyo.ac.jp/research/dp/2023/2023cj307ab.html>
- 岩本康志(2025)『コロナ対策の政策評価：日本は合理的に対応したのか』慶応義塾大学出版会。
- 岩本康志(2026)「『接触8割削減』の科学的根拠(改訂版)」。
https://iwmtys.com/Books/2025-1/chap1_rev.html
- Kaps, Peter and Peter Rentrop (1979), "Generalized Runge-Kutta methods of order four with stepsize control for stiff ordinary differential equations," *Numerische Mathematik*, vol. 33, Issue 1, March, pp. 55–68. <https://doi.org/10.1007/BF01396495>
- 河合香織(2021)『分水嶺：ドキュメント コロナ対策専門家会議』岩波書店。
- Marcoline, Frank, Michael Grabe, Smita Nayak, Tim Zahnley, George Oster, Robert Macey (2022), *Berkeley Madonna User's Guide*, Version 10.4, September 28.
https://www.berkeleymadonna.com/downloads/BM_Users_Guide_10.4.pdf
- 仲田泰祐・芳賀沼和哉・塚原悠貴(2023)「第一波感染シミュレーションの再現性」。
<https://www.bicea.e.u-tokyo.ac.jp/policy-analysis-65/>
- 西浦博(2020a)「新型コロナウイルス感染症の流行シナリオ(2月29日時点)」日本医療研究開発機構感染症実用化研究事業(新興・再興感染症に対する革新的医薬品等開発推進研究事業)「感染症対策に資する数理モデル研究の体制構築と実装」。

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/novel_coronavirus/senmonkakaigi/sidai_r020302.pdf

西浦博(2020b)「特別寄稿：西浦博・北大教授「8割おじさん」の数理モデル」『ニューズウィーク日本版』、6月9日号。

<https://www.newsweekjapan.jp/stories/world/2020/06/8-39.php>

西浦博・川端裕人(2020)『理論疫学者・西浦博の挑戦 新型コロナからいのちを守れ!』中央公論新社。

Nishiura, Hiroshi, Natalie M Linton, Andrei R Akhmetzhanov (2020), “Serial interval of novel coronavirus (COVID-19) infections,” *International Journal of Infectious Diseases*, Vol. 93, April, pp. 284–286. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.02.060>

鈴木絢子・西浦博(2020a)「感染症の数理モデルと対策」『日本内科学会雑誌』第109巻第11号、11月、p. 2276–2280。 <https://doi.org/10.2169/naika.109.2276>

鈴木絢子・西浦博(2020b)「新型コロナウイルス感染症の疫学について」『インフルエンザ』第21巻第4号、12月、p. 195–201。

高橋泰・江口成美・石川雅俊(2020)「地域の医療提供体制の現状 - 都道府県別・二次医療圏別データ集 - (2020年4月第8版)」日医総研ワーキングペーパー、No. 443。

<https://www.jmari.med.or.jp/download/WP443/WP443-appendix.pdf>

Tsitouras, Ch. (2011), “Runge–Kutta pairs of order 5(4) satisfying only the first column simplifying assumption,” *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 62, Issue 2, July, pp. 770–775. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.06.002>

付録 A 年齢構造化 SIR モデルの解説

A.1 ソースコード

この付録では、西浦教授が接触 8 割削減の提言時に用いた数理モデル（年齢構造化 SIR モデル）を解説する（西浦 2020b）。GitHub で 5 月 27 日に公開されたソースコード²⁸を図 A.1 に示している。

図 A.1 年齢構造化 SIR モデルのソースコード

```
1      DT = 0.1
2
3      d/dt (S_c) = -lambda_c*S_c
4      d/dt (I_c) =lambda_c*S_c - gamma*I_c
5      d/dt (R_c) = gamma*I_c
6      d/dt (S_a) = -lambda_a*S_a
7      d/dt (I_a) =lambda_a*S_a - gamma*I_a
8      d/dt (R_a) = gamma*I_a
9      d/dt (S_e) = -lambda_e*S_e
10     d/dt (I_e) =lambda_e*S_e - gamma*I_e
11     d/dt (R_e) = gamma*I_e
12
13     {(alpha_a*N_a+alpha_e*N_e+alpha_c*N_c)}
14     lambda_c = (gamma*R0/N_c)* alpha_c/ (alpha_a+alpha_e+alpha_c)*
15               (I_c + I_a + I_e)
16     lambda_a = (gamma*R0/N_a)* alpha_a/ (alpha_a+alpha_e+alpha_c)*
17               (I_c + I_a + I_e)
18     lambda_e = (gamma*R0/N_e)* alpha_e/ (alpha_a+alpha_e+alpha_c)*
19               (I_c + I_a + I_e)
20
21
22     Death_c=R_c*IFR_c
23     Death_a=R_a*IFR_a
24     Death_e=R_e*IFR_e
25
26     alpha_c = 0.009
27     alpha_a = 0.630
```

²⁸ https://github.com/contactmodel/COVID19-Japan-Reff/blob/master/BerkleyMadonna_May2020.txt

ソースコードは 46 行あるが、末尾の空白の 2 行は省略して、44 行を示している。

```
24     alpha_e = (1-alpha_c-alpha_a)
25     gamma= 1/4.8
26     R0 =2.5
27
28     IFR_c = 0
29     IFR_a = 0.0015
30     IFR_e = 0.0100
31
32     init S_c = 15758424
33     init I_c = 0
34     init R_c = 0
35     init S_a = 76499818
36     init I_a = 10
37     init R_a = 0
38     init S_e = 35185241
39     init I_e = 0
40     init R_e = 0
41     N_c = S_c + I_c + R_c
42     N_a = S_a + I_a + R_a
43     N_e = S_e + I_e + R_e
44     N=N_c+N_a+N_e
```

(出典) https://github.com/contactmodel/COVID19-Japan-Reff/blob/master/BerkleyMadonna_May2020.txt

A.2 異質感受性モデル

以下、Berkeley Madonna の文法の知識がなくても計算内容が理解できるように、ソースコードの内容を解説する。

```
1     DT = 0.1
```

モデルは連続時間で表現されるが、数値計算は離散時間でおこなうので、単位期間を1/10日と設定している。本稿では、モデルの時間を t として説明する。

```
32     init S_c = 15758424
33     init I_c = 0
34     init R_c = 0
35     init S_a = 76499818
```

```

36   init I_a = 10
37   init R_a = 0
38   init S_e = 35185241
39   init I_e = 0
40   init R_e = 0
41   N_c = S_c + I_c + R_c
42   N_a = S_a + I_a + R_a
43   N_e = S_e + I_e + R_e
44   N=N_c+N_a+N_e

```

人口が、小児 (c)、成年 (a)、高齢者 (e) の年齢階層に区分され、それぞれ括弧内の添え字によって表される²⁹。また、SIR モデルとして、人口は感受性人口 (S)、感染性人口 (I)、除外人口 (R) に区分され、それぞれ括弧内の記号で表される。人口 (N) の初期値の設定は、「平成 31 年 1 月 1 日住民基本台帳年齢階級別人口 (都道府県別) (総計)」に一致している。初期の感染性人口は、成年で 10 人と置かれている。32~40 行は、

$$S_c(0) = 15,758,424, S_a(0) = 76,499,818, S_e(0) = 35,185,241$$

$$I_a(0) = 10$$

$$I_c(0) = I_e(0) = R_c(0) = R_a(0) = R_e(0) = 0$$

のように表される。また、年齢階層別の人口は固定されて、41~44 行は、

$$N = N_c + N_a + N_e$$

$$N_c = S_c(t) + I_c(t) + R_c(t)$$

$$N_a = S_a(t) + I_a(t) + R_a(t)$$

$$N_e = S_e(t) + I_e(t) + R_e(t)$$

のように表すことができる。ソースコード 41 行の右辺第 3 項の N_c は N_e の誤記と思われるが、ここで定義される N がソースコードで使用されることはないので、問題は生じない。死亡者は除外人口に含まれたままであり、通常の人口の用語法 (生存者のみを指す) とは異なっていることに注意されたい。

```

3   d/dt (S_c) = -lambda_c*S_c
4   d/dt (I_c) = lambda_c*S_c - gamma*I_c
5   d/dt (R_c) = gamma*I_c
6   d/dt (S_a) = -lambda_a*S_a
7   d/dt (I_a) = lambda_a*S_a - gamma*I_a
8   d/dt (R_a) = gamma*I_a
9   d/dt (S_e) = -lambda_e*S_e

```

²⁹ 小児、成年、高齢者の呼称は、西浦(2020a)による。

$$10 \quad d/dt (I_e) = \lambda_e S_e - \gamma I_e$$

$$11 \quad d/dt (R_e) = \gamma I_e$$

感受性人口が感染する確率を感染力 λ (force of infection) として、年齢階層によって異なると想定する (異質感受性の想定)。感染力は、感受性人口の減少率で表され、

$$-\frac{\dot{S}_c(t)}{S_c(t)} = \lambda_c(t) \quad (1)$$

$$-\frac{\dot{S}_a(t)}{S_a(t)} = \lambda_a(t) \quad (2)$$

$$-\frac{\dot{S}_e(t)}{S_e(t)} = \lambda_e(t) \quad (3)$$

となる (ソースコードの 3、6、9 行)。

感受性以外の異質性はなく、感染性人口からの除外率 (平均世代時間の逆数) は同じであり、感染性人口の動学は、感受性人口からの流入と感染性人口からの流出によって、

$$\dot{I}_c(t) = \lambda_c S_c(t) - \gamma I_c(t)$$

$$\dot{I}_a(t) = \lambda_a S_a(t) - \gamma I_a(t)$$

$$\dot{I}_e(t) = \lambda_e S_e(t) - \gamma I_e(t)$$

で表される (ソースコードの 4、7、10 行)。除外人口の動学は、

$$\dot{R}_c(t) = \gamma I_c(t)$$

$$\dot{R}_a(t) = \gamma I_a(t)$$

$$\dot{R}_e(t) = \gamma I_e(t)$$

となる (ソースコードの 5、8、11 行)。

$$14 \quad \lambda_c = (\gamma R_0 / N_c) * \alpha_c / (\alpha_a + \alpha_e + \alpha_c) * (I_c + I_a + I_e)$$

$$15 \quad \lambda_a = (\gamma R_0 / N_a) * \alpha_a / (\alpha_a + \alpha_e + \alpha_c) * (I_c + I_a + I_e)$$

$$16 \quad \lambda_e = (\gamma R_0 / N_e) * \alpha_e / (\alpha_a + \alpha_e + \alpha_c) * (I_c + I_a + I_e)$$

全体の感染性人口 I は、年齢階層別の感染性人口を合計して、

$$I(t) = I_c(t) + I_a(t) + I_e(t) \quad (4)$$

で表され、感染力を

$$\lambda_c(t) = \beta_c I(t) \quad (5)$$

$$\lambda_a(t) = \beta_a I(t) \quad (6)$$

$$\lambda_e(t) = \beta_e I(t) \quad (7)$$

で表すとすると、感受性人口の動学は(5)~(7)式を(1)~(3)式に代入して

$$\dot{S}_c(t) = -\beta_c S_c(t) I(t) \quad (8)$$

$$\dot{S}_a(t) = -\beta_a S_a(t) I(t) \quad (9)$$

$$\dot{S}_e(t) = -\beta_e S_e(t) I(t) \quad (10)$$

と表され、感染性は同質で感受性が年齢階層によって異質な SIR モデルの形式となる。さらに

$$\beta_c = \frac{\alpha_c}{N_c} \gamma \mathcal{R}_0 \quad (11)$$

$$\beta_a = \frac{\alpha_a}{N_a} \gamma \mathcal{R}_0 \quad (12)$$

$$\beta_e = \frac{\alpha_e}{N_e} \gamma \mathcal{R}_0 \quad (13)$$

と置いたものが、ソースコードの 14~16 行に対応する。

```

22     alpha_c = 0.009
23     alpha_a = 0.630
24     alpha_e = (1-alpha_c-alpha_a)
25     gamma= 1/4.8
26     R0 =2.5

```

ここで、 \mathcal{R}_0 は基本再生産数で 2.5 と設定される。22~24 行で設定された感受性の差異を表現するパラメータの値は、 $\alpha_c = 0.009$ 、 $\alpha_a = 0.630$ 、 $\alpha_e = 0.361$ であり、24 行で示された通り、合計が 1 になるように設定されている。

平均世代期間は 4.8 日と置かれている (25 行)。Nishiura, Linton and Akhmetzhanov (2020) での 18 例のリンクにワイブル分布を当てはめた発症間隔 (serial interval) の平均値と一致している。

```

28     IFR_c = 0
29     IFR_a = 0.0015
30     IFR_e = 0.0100

```

28~30 行で、致死率 (感染者当たり死亡者) は、成年 0.15%、高齢者 1% と設定されている。ただし、2.1 節で示されたように、この数値では 4 月 15 日資料を再現できない。

A.3 多次元 SIR モデルの基本再生産数

新規感染者の動学は、(4)式、(11)~(13)式を(8)~(10)式に代入して、

$$-\dot{S}_c(t) = \gamma \mathcal{R}_0 \frac{S_c(t)}{N_c} \alpha_c (I_c(t) + I_a(t) + I_e(t))$$

$$-\dot{S}_a(t) = \gamma \mathcal{R}_0 \frac{S_a(t)}{N_a} \alpha_a (I_c(t) + I_a(t) + I_e(t))$$

$$-\dot{S}_e(t) = \gamma \mathcal{R}_0 \frac{S_e(t)}{N_e} \alpha_e (I_c(t) + I_a(t) + I_e(t))$$

となる。これをベクトルと行列を使い、多次元 SIR モデルとして表現すると、

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_c(t) \\ \dot{I}_a(t) \\ \dot{I}_e(t) \end{bmatrix} = \gamma \mathcal{R}_0 \begin{bmatrix} S_c(t)\alpha_c/N_c & S_c(t)\alpha_c/N_c & S_c(t)\alpha_c/N_c \\ S_a(t)\alpha_a/N_a & S_a(t)\alpha_a/N_a & S_a(t)\alpha_a/N_a \\ S_e(t)\alpha_e/N_e & S_e(t)\alpha_e/N_e & S_e(t)\alpha_e/N_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c(t) \\ I_a(t) \\ I_e(t) \end{bmatrix} - \gamma \begin{bmatrix} I_c(t) \\ I_a(t) \\ I_e(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

となる。行列の変数が初期値で固定され、感染者数が同じ変化率 $(\beta - \gamma)$ で変化するとすると、(14)式は、

$$\begin{bmatrix} (\beta - \gamma)I_c(t) \\ (\beta - \gamma)I_a(t) \\ (\beta - \gamma)I_e(t) \end{bmatrix} = \gamma \mathcal{R}_0 \begin{bmatrix} \alpha_c & \alpha_c & \alpha_c \\ \alpha_a & \alpha_a & \alpha_a \\ \alpha_e & \alpha_e & \alpha_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c(t) \\ I_a(t) \\ I_e(t) \end{bmatrix} - \gamma \begin{bmatrix} I_c(t) \\ I_a(t) \\ I_e(t) \end{bmatrix}$$

となり、これを整理すると、

$$\mathcal{R}_0 \begin{bmatrix} \alpha_c & \alpha_c & \alpha_c \\ \alpha_a & \alpha_a & \alpha_a \\ \alpha_e & \alpha_e & \alpha_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_c(t) \\ I_a(t) \\ I_e(t) \end{bmatrix} = \frac{\beta}{\gamma} \begin{bmatrix} I_c(t) \\ I_a(t) \\ I_e(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

となる。(15)式を満たす β/γ は、左辺の行列（次世代行列）

$$\mathcal{R}_0 \begin{bmatrix} \alpha_c & \alpha_c & \alpha_c \\ \alpha_a & \alpha_a & \alpha_a \\ \alpha_e & \alpha_e & \alpha_e \end{bmatrix}$$

の固有値となる。固有値は、行列式

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_0^3 \begin{vmatrix} \alpha_c - \mathcal{R}_0^{-1}\lambda & \alpha_c & \alpha_c \\ \alpha_a & \alpha_a - \mathcal{R}_0^{-1}\lambda & \alpha_a \\ \alpha_e & \alpha_e & \alpha_e - \mathcal{R}_0^{-1}\lambda \end{vmatrix} &= \mathcal{R}_0^3 \begin{vmatrix} -\mathcal{R}_0^{-1}\lambda & 0 & \alpha_c \\ \mathcal{R}_0^{-1}\lambda & -\mathcal{R}_0^{-1}\lambda & \alpha_a \\ 0 & \mathcal{R}_0^{-1}\lambda & \alpha_e - \mathcal{R}_0^{-1}\lambda \end{vmatrix} \\ &= \mathcal{R}_0 \lambda^2 \begin{vmatrix} -1 & 0 & \alpha_c \\ 1 & -1 & \alpha_a \\ 0 & 1 & \alpha_e - \mathcal{R}_0^{-1}\lambda \end{vmatrix} = -\lambda^2 [\lambda - \mathcal{R}_0(\alpha_c + \alpha_a + \alpha_e)] = 0 \end{aligned}$$

を満たす $\lambda (= \beta/\gamma)$ であり、 $\mathcal{R}_0(\alpha_c + \alpha_a + \alpha_e) = \mathcal{R}_0$ と 0（重根）となる。絶対値が最大の固有値が基本再生産数と定義されるので、それが \mathcal{R}_0 となるようにモデルの記号がもともと定義されている。 \mathcal{R}_0 が 1 より大きければ、 $\beta - \gamma > 0$ となるので、初期に少数の感染者が存在すると感染症が流行することを示している。

最大固有値に対応する固有ベクトルは、

$$\mathcal{R}_0 \begin{bmatrix} \alpha_c & \alpha_c & \alpha_c \\ \alpha_a & \alpha_a & \alpha_a \\ \alpha_e & \alpha_e & \alpha_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ x_a \\ x_e \end{bmatrix} = \mathcal{R}_0 \begin{bmatrix} x_c \\ x_a \\ x_e \end{bmatrix} \quad (16)$$

を満たすベクトル

$$\begin{bmatrix} x_c \\ x_a \\ x_e \end{bmatrix}$$

である。(16)式の両辺を \mathcal{R}_0 で割り、整理すると

$$\begin{aligned} x_c &= \alpha_c(x_c + x_a + x_e) \\ x_a &= \alpha_a(x_c + x_a + x_e) \end{aligned}$$

$$x_e = \alpha_e(x_c + x_a + x_e)$$

となる。固有ベクトル空間は、ベクトル

$$\begin{bmatrix} \alpha_c \\ \alpha_a \\ \alpha_e \end{bmatrix}$$

を含むものとなり、流行初期の年齢階層別の感染者の比率は、この固有ベクトルの比率に近いものとなることが予想される。もし感受性が同質的であるなら、年齢階層別の感染者の比率は人口の比率になっているはずである。したがって、両者の比率をとったベクトル

$$\begin{bmatrix} \alpha_c/N_c \\ \alpha_a/N_a \\ \alpha_e/N_e \end{bmatrix}$$

は感受性の差異の指標となる。このことは、(11)～(13)式で示されている。

ソースコードで設定された値を使い、 α_a/N_a を1と基準化すると、このベクトルは、

$$\begin{bmatrix} 0.07 \\ 1 \\ 1.25 \end{bmatrix}$$

となる。つまり、小児の感染しやすさは成年の約0.07倍（14分の1）であり、高齢者は成年の約1.25倍感染しやすいと設定されている。

付録 B 数値計算の方法

B.1 1 段階法

付録 B は、微分方程式の数値計算の方法を概説する。付録 A で説明した年齢構造化 SIR モデルは、6 変数の自律系の微分方程式と表現できる。自律系の一般的な形式は、 x をベクトルとして

$$\dot{x}(t) = f(x(t))$$

となる。年齢構造化モデルでは、 $x^T = [S_c, S_a, S_e, I_c, I_a, I_e]$ となる。 T は転置ベクトルを表す。以下、一般形での計算方法を説明する。

初期値問題の数値計算では、初期時点 t_0 から小さな区間 (step) で離散的に近似値を求めていく。 N 区間 (t_n から t_{n+N-1}) の情報を用いて、つぎの区間 (t_{n+N-1} から t_{n+N}) を計算する多段階法の計算式は、離散化した変数を $x_n \equiv x(t+n)$ と定義すると、

$$x_{n+N} = a_{N-1}x_{n+N-1} + a_{N-2}x_{n+N-2} + \dots + a_0x_n + h\Phi(x_{n+N}, x_{n+N-1}, \dots, x_n) \\ a_{N-1} + \dots + a_0 = 1$$

である。 h は区間幅である。 $N = 1$ となる 1 段階法の計算式は、

$$x_{n+1} = x_n + h\Phi(x_{n+1}, x_n) \quad (17)$$

である。1 段階法では、以前の区間の情報を使わない。多段階法では区間幅は固定されていないと実用的ではないが、1 段階法では区間幅を変えることは容易であり、近似誤差に合わせて区間幅が調整される方法 (適応型) がある。適応型では、(17) 式の h の大きさが区間によって異なる。

Berkeley Madonna では、計算方法に Euler、RK2、RK4、Auto、Stiff の 5 種類のオプションがあり、デフォルトは RK4 になっている³⁰。いずれも 1 段階法で、最初の 3 つは区間幅固定の方法である。

B.2 オイラー法

ここでは 1 段階法のみに着目して、区間幅を h として、 $t_n = t$ 、 $t_{n+1} = t+h$ として、時点 $t+h$ の x を計算することを考える。これは、時点 t と $t+h$ の x を結んだ直線の傾きを計算することに等しい。

オイラー法は、直線の傾きとして厳密解の時点 t での接線を用いて、

$$\frac{x(t+h) - x(t)}{h} = f(x(t))$$

と計算する。これを变形すると、

$$x(t+h) = x(t) + hf(x(t))$$

となる。

³⁰ 各方法の説明は、Marcoline et al. (2022, p.45-)にある。

時点 $t+h$ の x を時点 t で1次の項までテーラー展開すると、

$$x(t+h) \approx x(t) + h\dot{x}(t) = x(t) + hf(x(t))$$

となるので、厳密解のテーラー展開と数値計算は1次の項が一致する。

B.3 中点法

(陽的) 中点法は、時点 t と $t+h$ の x を結んだ直線の傾きとして、中間の時点 $t+h/2$ での厳密解の接線を用いて、

$$\frac{x(t+h) - x(t)}{h} = f\left(t + \frac{h}{2}\right)$$

で計算する。これを变形すると、

$$x(t+h) = x(t) + hf\left(x\left(t + \frac{h}{2}\right)\right) \quad (18)$$

が得られる。しかし、時点 $t+h/2$ の x が未知なので、これをオイラー法で

$$x\left(t + \frac{h}{2}\right) = x(t) + \frac{h}{2}f(x(t))$$

と求め、(18)式に代入すると、

$$x(t+h) = x(t) + hf\left(x(t) + \frac{h}{2}f(x(t))\right) \quad (19)$$

のように、時点 $t+h$ の x を計算することができる。これが、中点法の計算式となる。

(19)式の右辺第2項を1次の項までテーラー展開すると、

$$x(t+h) \approx x(t) + h\left(f(x(t)) + \frac{h}{2}f(x(t))f'(x(t))\right)$$

となる。厳密解の2次の項までのテーラー展開は、

$$x(t+h) \approx x(t) + h\dot{x}(t) + \frac{h^2}{2}\ddot{x}(t) = x(t) + hf(x(t)) + \frac{h^2}{2}f(x(t))f'(x(t))$$

となるので、厳密解と中点法のテーラー展開は2次の項まで一致する。

B.4 ルンゲ=クッタ法

(古典的) ルンゲ=クッタ法は、

$$\begin{aligned} k_1(t) &= f(x(t)) \\ k_2(t) &= f\left(x(t) + \frac{h}{2}k_1(t)\right) \\ k_3(t) &= f\left(x(t) + \frac{h}{2}k_2(t)\right) \\ k_4(t) &= f(x(t) + hk_3(t)) \end{aligned}$$

$$x(t+h) \approx x(t) + h \left(\frac{1}{6}k_1(t) + \frac{1}{3}k_2(t) + \frac{1}{3}k_3(t) + \frac{1}{6}k_4(t) \right)$$

によって、時点 $t+h$ の x を計算する。

B.5 (広義の) ルンゲ=クッタ法

以上の方法を含んだ (広義の) ルンゲ=クッタ法 (Runge-Kutta methods) は、 s を段数 (stage) として、

$$k_1 = f(x(t))$$

$$k_i = f \left(x(t) + h \sum_{j=1}^s a_{ij} k_j \right)$$

$$x(t+h) = x(t) + h \sum_{i=1}^s b_i k_i$$

で表される。 a_{ij} を要素にもつ行列を A 、 b_i を要素にもつベクトルを b と定義しておく。 A が下三角行列であるときは陽解法と呼ばれ、逐次代入で解くことができる。

オイラー法はルンゲ=クッタ法での $A=0$ 、 $b^T=1$ と表すことができ、1段1次の方法である。

中点法は、

$$A = \begin{bmatrix} & & \\ 1/2 & & \\ & & \end{bmatrix}$$

$$b^T = [\quad 1]$$

と表すことができ、2段2次の方法である。 A の空白は0を表す。小児の未感染者をルンゲ=クッタ法の様式で記述すると、

$$k_{1,S_c}(t) = -New(\beta_c(t), S_c(t), I(t))$$

$$k_{2,S_c}(t) = -New \left(\beta_c(t), S_c(t) + \frac{h}{2} k_{1,S_c}(t), I(t) + \frac{h}{2} k_{1,I}(t) \right)$$

$$S_c(t+h) \approx S_c(t) + h k_{2,S_c}$$

となる。

古典的ルンゲ=クッタ法は、

$$A = \begin{bmatrix} & & & \\ & 1/2 & & \\ & & 1/2 & \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$b^T = \left[\frac{1}{6} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{6} \right]$$

となる。ルンゲ=クッタ法は、4段4次の方法である。

B.6 その他の方法

Auto オプションは、適応型ルンゲ=クッタ法の 1 種であり、Cash-Karp 法 (Cash and Karp 1990) を用いる。適応型ルンゲ=クッタ法では、 n 次と $n-1$ 次のルンゲ=クッタ法の計算結果の差が閾値より大きい場合に、区間幅を縮小して計算することで、近似誤差を小さくするものである。高次の方法で使用する行列 A の主小行列が低次の方法の行列に相当する場合には、低次の方法の行列をあらためて計算する必要がない。たとえば、オイラー法の A は中点法の A の主小行列になっていることから、中点法で計算する際に b を違えるだけでオイラー法も同時に計算できる。これは、2(1)次の方法と表現される。Cash-Karp 法は、6 段 5(4)次である。

適応型ルンゲ=クッタ法は、他のソフトウェアでも標準として使われている。Dormand-Prince 法 (Dormand and Prince 1980) は、7 段 5(4)次の方法であり、MATLAB での標準的な ode ソルバーとされている (ode45)³¹。また、Python の SciPy ライブラリの `scipy.integrate.solve_ivp` 関数の標準となる³²。7 段 5(4)次の Tsitouras 法 (Tsitouras 2011) は、Julia の DifferentialEquations.jl パッケージで使用が推奨されている (Tsit5)³³。

硬い (stiff) 方程式に適用する Stiff オプションは、 A が下三角行列でない陰解法の一つである Rosenbrock 法 (Kaps-Rentrop 法 [Kaps and Rentrop 1979]とも呼ばれる) を用いる。

³¹ 「ODE ソルバーの選択」 <https://jp.mathworks.com/help/matlab/math/choose-an-ode-solver.html>

³² https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.integrate.solve_ivp.html

³³ ODE Solvers. https://docs.sciml.ai/DiffEqDocs/stable/solvers/ode_solve/

付録 C 再現コード

C.1 コードの構成と関数

本稿での再現作業は R を使用し、その結果を出力する Quarto コードは、GitHub で公開 (https://github.com/iwmttyss/covid/blob/master/COVID_Age3_2020_results.qmd) している。その HTML 出力は、筆者のサイトで公開 (https://iwmttyss.com/Books/2025-1/COVID_Age3_2020_results.html) している。使用した R とパッケージのバージョンは、R (4.5.1)、tidyverse (2.0.0)、deSolve (1.40)、Quarto (1.4.62) である。コードの構成は、

0. 設定
1. 3月19日資料
2. 3月2日資料
3. 4月3日資料
4. 4月9日資料
5. 鈴木・西浦(2020a)
6. 鈴木・西浦(2020b)

となっており、0 が関数ライブラリ、1~6 が各資料を再現するシナリオとなる。

表 C.1 は、関数ライブラリに含まれる関数の一覧である。

表 C.1 関数一覧

<code>set_control</code>	時間と計算方法の設定
<code>set_population</code>	人口の設定
<code>set_parms</code>	疫学パラメータの設定
<code>set_intervention</code>	介入の設定
<code>set_input</code>	ファクターXの設定
<code>model_sir</code>	SIR モデルの解を求める
<code>model_seir</code>	SEIR モデルの解を求める
<code>Plot_New</code>	新規感染者数のプロット
<code>Plot_I</code>	感染者数のプロット

コードの中核となるのは、SIR モデルを解く `model_sir` 関数と SEIR モデルを解く `model_seir` 関数である。それぞれの関数の引数は、

```
model_sir(scenario, aggr = FALSE)
```

```
model_seir(scenario, aggr = FALSE)
```

となる。引数 `scenario` (シナリオ) は、結果を識別する名前であり、戻り値 `scenario` の値となる。命名方法は自由であるが、本稿ではシナリオ 1 は `scenario_01`、のように命名

している。引数 `aggr` は、`FALSE`（既定値）のとき年齢階層ごとの人口を計算し、`TRUE` のとき集計値を計算する。これらの引数の他に、4種類のパラメータのリスト

`control`（時間と計算方法）

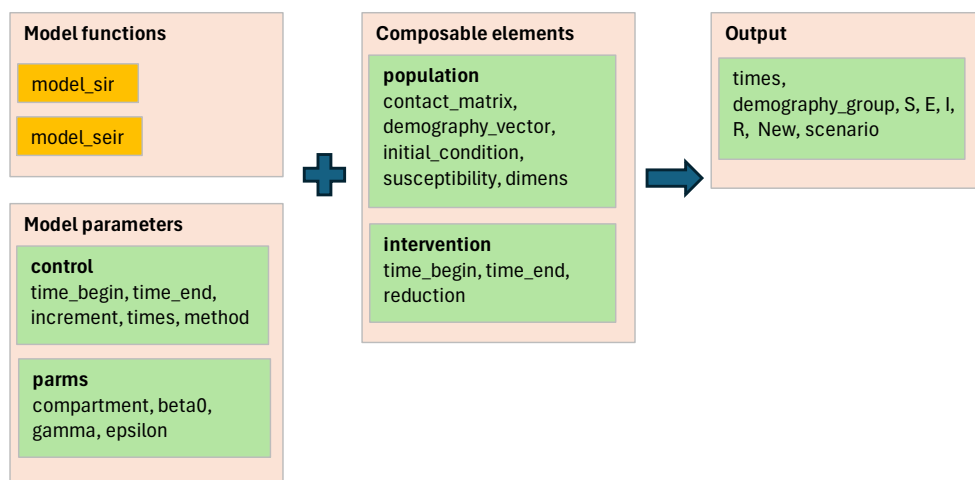
`population`（人口）

`parms`（疫学パラメータ）

`intervention`（介入）

を参照する。パラメータはそれぞれ、`epidemics` パッケージ³⁴に類似した用語を用いている³⁵。これらは関数の引数ではなく、グローバル変数として参照される。図 C.1 は、モデルを計算する関数とパラメータをまとめたものである。

図 C.1 コードの構成



（注）関数は `model_sir`、`model_seir` の 2 種類からなり、詳細は C.2 節で説明する。パラメータ（リスト）は、`control`、`population`、`parms`、`intervention` の 4 種類からなり、詳細は C.4 節で説明する。図は、`epidemics` パッケージの概念図（<https://epiverse-trace.r-universe.dev/articles/epidemics/design-principles.html>）に類似した形式としている。

³⁴ `epidemics` は、ロンドン大学衛生熱帯医学大学院（London School of Hygiene & Tropical Medicine、LSHTM）の感染症数理モデルセンター（Centre for Mathematical Modelling of Infectious Diseases、CMMID）が開発している R パッケージである（Gupte, Eggo, van Leeuwen 2025）。

本稿では独自にコードを開発し、その内部構造は `epidemics` とはまったく異なるが、学習を容易にするためにオブジェクトには類似の命名をしている。

³⁵ `epidemics` パッケージでは S4 オブジェクトとして実装されているが、ここでは単にリストとして実装している。

C.2 SEIR モデルの解説

`model_sir` 関数と `model_seir` 関数の構造はほぼ同じなので、後者の内容のみを説明する。そのため、SEIR モデルを説明する。

SEIR モデルでは、感染したが他人に感染させない暴露人口 E (exposure) を考える。そして、暴露人口から一定の率で感染性をもつ感染者に移行する。ここが、感染するとただちに感染性をもつ感染者に移行する SIR モデルを違うところである。他人に感染させる可能性をもつが、感染から感染性をもつまでの時間を感染性待機時間と呼ぶ (感染から発症までの潜伏期間とは別の概念である)。年齢階層ごとに、モデルは

$$\begin{aligned}\dot{S}_i(t) &= -New_i(t) \\ \dot{E}_i(t) &= New_i(t) - \varepsilon E_i(t) \\ \dot{I}_i(t) &= \varepsilon E_i(t) - \gamma I_i(t) \\ \dot{R}_i(t) &= \gamma I_i(t)\end{aligned}\tag{20}$$

のように記述できる。新規感染者の発生は、感染者との接触によって生じ、

$$New_i(t) = \frac{S_i(t)}{N_i} p_i(t) \sum_j m_{ij}(t) I_j(t)\tag{21}$$

と表される。ここで、 m_{ij} は年齢階層 j が 1 人当たり何人の年齢階層 i と接触するのかわを示す。 p は未感染者が 1 回の接触によって感染する確率 (二次感染率、secondary attack rate) を示し、年齢階層によって異なるとしている。(21)式を感染者の視点から見ると、年齢階層 j の感染者が年齢階層 i と接し、そのうちの感染の可能性のある者の割合 S/N と二次感染率によって、新規感染者数が決定される。

人口のほとんどが未感染者であり、 $S/N = 1$ で(21)式を近似できるとして、(21)式をベクトルと行列を用いて表すと、

$$\begin{bmatrix} New_1(t) \\ \vdots \\ New_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1(0)m_{11} & \dots & p_1(0)m_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_n(0)m_{n1} & \dots & p_n(0)m_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(t) \\ \vdots \\ I_n(t) \end{bmatrix}$$

となる。実際の計算では接触行列は時間を通して変化しない。(21)式が直接含意する基本再生産数とは違った基本再生産数 \mathcal{R}_0 を与えるためには、行列 $(p_i(0)m_{ij})$ の最大固有値を λ とし、これと違う $\beta_0 \equiv \gamma \mathcal{R}_0$ を定義して、(21)式を

$$New_i(t) = \beta_0 X_i(t) \frac{S_i(t)}{N_i} \left(\sum_j \frac{p_i(0)m_{ij}}{\lambda} I_j(t) \right)\tag{22}$$

のように調整する。ここで、

$$X_i(t) \equiv \frac{p_i(t)}{p_i(0)}$$

である。(22)式の右辺の変数が初期値をとるとき、

$$New_i(t) = \sum_j \frac{\beta_0 p_i(0) m_{ij}}{\lambda} I_j(t)$$

となる。

R でベクトル演算することを意識して、

$$J_i(t) \equiv \sum_j \frac{p_i(0) m_{ij}}{\lambda} I_j(t)$$

$$\beta_i(t) \equiv \beta_0 X_i(t)$$

と定義すると、新規感染者数は、

$$New_i(t) = \beta_i(t) \frac{S_i(t)}{N_i} J_i(t) \quad (23)$$

で表される。

コードでは、deSolve パッケージの `ode` 関数によって微分方程式を解き、 S 、 E 、 I を行列（行に時間 t 、列に年齢階層 i ）の形で得る。R の演算子「*」は行列の要素ごとの積を計算するので、簡潔なコードで(23)式の計算が可能となる。関数の戻り値は `tibble` オブジェクトであり、変数は `times`（計算時間、time scale）、`demography_group`（年齢階層）、 S （感受性人口、未感染者）、 E （暴露人口）、 I （感染性人口、感染者）、 R （除外人口、回復・死亡者）、`New`（新規感染者）、`scenario`（シナリオ）で、観測値は `times` の値である³⁶。本稿では、シナリオ 1 のための関数の戻り値は `result_01` のように命名している。

C.3 例

例として、4月3日資料を再現するコードは以下のようになる。モデル C を規定するために `control`、`population`、`parms` を設定して、接触削減なし、2割削減、8割削減のシナリオごとに `intervention` を設定する。

```
# 4月3日資料の再現
control <- set_control(time_end = 50)
N0_jp <- c(c = 15758424, a = 76499828, e = 35185241)
I0_jp <- c(0, 1, 0)
alpha_c <- 0.009
alpha_a <- 0.630
alpha_e <- 1 - alpha_c - alpha_a
susceptibility <- c(alpha_c, alpha_a, alpha_e) / N0_jp
population <- set_population(N0_jp, I0_jp, susceptibility =
susceptibility)
parms <- set_parms(compartment = "SIR")
## シナリオ 3
intervention <- list(set_intervention(time_begin = 30, reduction = 0))
result_03 <- model_sir(scenario = "削減なし", aggr = TRUE)
```

³⁶ `model_sir` 関数の戻り値には、モデルにない E は含まれない。

```
## シナリオ 4
intervention <- list(set_intervention(time_begin = 30, reduction =
0.2))
result_04 <- model_sir(scenario = "2 割削減", aggr = TRUE)
## シナリオ 5
intervention <- list(set_intervention(time_begin = 30, reduction =
0.8))
result_05 <- model_sir(scenario = "8 割削減", aggr = TRUE)
```

グラフを描くコードは以下のようになる。

```
## 新規感染者数のグラフ
rbind(result_03, result_04, result_05) |>
  plot_New() +
  scale_x_continuous(limits = c(0, 50), breaks = seq(0, 50, 10)) +
  scale_y_continuous(limits = c(0, 10000), breaks = seq(0, 10000,
2000)) +
  scale_colour_discrete(limits = c("削減なし", "2 割削減", "8 割削減"))
## 感染者数のグラフ
rbind(result_03, result_04, result_05) |>
  plot_I() +
  scale_x_continuous(limits = c(0, 50), breaks = seq(0, 50, 10)) +
  scale_y_continuous(limits = c(0, 100000), breaks = seq(0, 100000,
20000)) +
  scale_colour_discrete(limits = c("削減なし", "2 割削減", "8 割削減"))
```

基本再生産数を違えた分析では、シナリオごとに `parms` を設定する。

C.4 パラメータ

4 種類のパラメータ群は、「`set_`」を接頭辞とする関数の戻り値で設定される。多くのパラメータはこれらの関数の引数で設定され、そのまま戻り値になるが、一部のパラメータは関数のなかで計算されて、戻り値となる。モデルを計算する関数が、これらの戻り値を参照する構造になっている。

control

`control` は時間と微分方程式の数値計算手法に関するパラメータの集合であり、`time_begin` (計算の始期 t_0)、`time_end` (計算の終期)、`increment` (区間幅 h)、`times` (計算時間)、`method` (微分方程式の解法) からなる。

モデルの計算時間は、実時間 t をより細かく刻む。本稿のモデルでは時間の単位は日であるが、計算時間の単位 (区間幅) は 0.1 日である。`times` は `set_population` 関数で計算され、始期を 1、終期を $(\text{time_end} - \text{time_begin}) / \text{increment} + 1$ と置いて、1 だけ

増えていくベクトルとして得られる。

`method` は、微分方程式を解く `deSolve` パッケージで使用する方法であり、パッケージの `ode` 関数の引数 `method` に渡される。既定値は、古典的ルンゲ=クッタ法 ("`rk4`") である。

population

`population` は、人口に関連するパラメータの集合であり、`contact_matrix` (接触行列)、`demography_vector` (人口 N_i)、`initial_condition` (感染者数の初期値 $I_i(0)$)、`susceptibility` (感受性)、`dimens` (年齢階層の数) である。年齢階層の名称は `demography_vector` の要素の名前として与えられ、`demography_group` の値となる。

本稿では `set_population` 関数の引数として、以下の 4 種類の設定がされている。

	モデル AB	モデル CD	モデル E	モデル F
<code>contact_matrix</code>	$m_{ij} = N_i$	$m_{ij} = N_i$	1	1
<code>demography_vector</code>	N_i	N_i	10,000	100,000
<code>initial_condition</code>	(0, 10, 0)	(0, 1, 0)	1	1
<code>susceptibility</code>	α_i/N_i	α_i/N_i	1	1

(注) モデル A から D で、 $N = (15758424, 76499828, 35185241)$ 、 $\alpha = (0.009, 0.630, 0.361)$ 。

`contact_matrix` は、`set_population` 関数の引数には(21)式の行列(m_{ij})が設定されるが、戻り値は(22)式の行列($p_i(0)m_{ij}/\lambda$)となる。`dimens` は、人口のデータの長さから計算される。

parms

`parms` は感染症の性質に関するパラメータの集合であり、以下の 4 種類である。

`compartment` 区画の種類を示す。SIR モデルでは"`sir`"、SEIR モデルでは"`seir`"となる³⁷。

`beta0` 感染率 (伝播率、 β_0)、基本再生産数と平均世代時間から計算される。

`gamma` 平均世代時間の逆数 (γ)。

`epsilon` 平均感染性待機時間の逆数 ((20)式の ϵ)。

これらは、`set_parms` 関数によって設定する。この関数の引数には `beta0` がなく、かわりに `r0` (基本再生産数 \mathcal{R}_0) が使われる。感染率は、

$$\text{beta0} = \text{gamma} * \text{r0}$$

によって計算する。

各モデルの基本値は、以下のように設定される。

³⁷ `epidemics` パッケージでは、`population` に含まれるパラメータであるが、本稿のコードでは、`parms` に含める。

	モデル A	モデル B	モデル CD	モデル E	モデル F
compartment	"sir"	"sir"	"sir"	"seir"	"sir"
r0	2.5	2.0	2.5	2.5	2.5
gamma	4.8	4.8	4.8	10	4.8
epsilon				5	

intervention

intervention は、一定期間に一定率の接触削減をおこなう公衆衛生的介入に関するパラメータの集合であり、`time_begin`（接触削減の始期）、`time_end`（終期）、`reduction`（期間中の接触削減割合 x ）からなる。

段階的に接触削減する場合は、

```
intervention <- list(
  set_intervention(time_begin = 20, time_end = 27, reduction = 0.4),
  set_intervention(time_begin = 27, time_end = 35, reduction = 0.6),
  set_intervention(time_begin = 35, reduction = 0.8)
)
```

のように、`set_intervention` 関数の戻り値をリストにして設定する。接触削減割合が年齢階層ごとに異なる場合は、年齢階層に対応したベクトルで指定する。本稿で使用していないが、たとえば、上記の式で15歳未満は接触削減しない場合は、

```
reduction = c(0, 0.6, 0.6)
```

のように設定すればよい。計算期間の終わりまで削減が持続する場合は、終了時点を設定しなくてもいい（既定値が計算期間の終期となっている）。接触削減割合が単一の場合は、

```
intervention <- list(set_intervention(time_begin = 20, reduction = 0.8))
```

のように設定する。

数値計算では、開始時点から1計算時間経過後から削減が始まるようにしている。開始時点の値は、接触削減前の状態として計算される。

C.5 シナリオ

パラメータの組み合わせによって、以下の表 C.2 と表 C.3 に示した 25 のシナリオを計算している。各シナリオの感染者数と新規感染者数のグラフは、https://github.com/iwmtys/covid/blob/master/COVID_Age3_2020.qmd によって作図されている。

表 C.2 は、年齢構造化 SIR モデルによる再現（シナリオ 1 から 12 まで）であり、本文と図で使用したものの一覧になっている。

表 C.2 削減率のシナリオ（シナリオ 1~12）

番号	モデル	再現対象	使用する変数	計算期間	使用箇所
1	B	3月22日資料 4月15日資料	新規感染者数 流行最終規模 流行最終規模	300	本文 本文 本文
2	A	3月2日資料	流行最終規模	300	本文
3	C	4月3日資料	新規感染者数	50	図1 (削減なし)
4	C	4月3日資料	新規感染者数	50	図1 (2割削減)
5	C	4月3日資料	新規感染者数	50	図1 (8割削減)
6	D	4月9日資料	感染者数	90	図2 (段階的削減)
7	D	4月9日資料	感染者数	90	図2 (7割削減)
8	D	4月9日資料 4月22日資料	感染者数 感染者数	90	図2 (8割削減) 図3 (8割削減)
9	D	4月22日資料	感染者数	90	図3 (6.5割削減)
10	D	4月9日資料	新規感染者数	90	図4 (8割削減)
11	D	4月9日資料	新規感染者数	90	図4 (7割削減)
12	D	4月9日資料	新規感染者数	90	図4 (6.5割削減)

表 C.3 は、鈴木・西浦(2020a、2020b)の再現 (シナリオ 12~25) の一覧である。

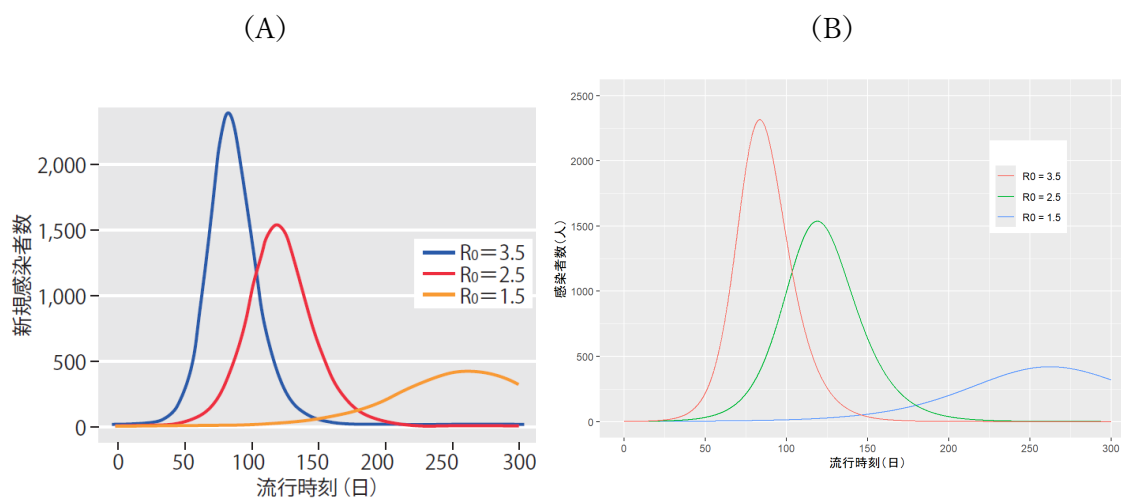
表 C.3 削減率のシナリオ (シナリオ 13~25)

番号	モデル	再現対象	使用する変数	計算期間	使用箇所
13	E	2020a、図4	感染者数	300	図 B.2 ($\mathcal{R}_0 = 3.5$)
14	E	2020a、図4	感染者数	300	図 B.2 ($\mathcal{R}_0 = 2.5$)
15	E	2020a、図4	感染者数	300	図 B.2 ($\mathcal{R}_0 = 1.5$)
16	E	2020a、図5	感染者数	300	図 B.3 (4割削減)
17	E	2020a、図5	感染者数	300	図 B.3 (6割削減)
18	E	2020a、図5	感染者数	300	図 B.3 (8割削減)
19	F	2020b、図4	感染者数	300	注 27
20	F	2020b、図4	感染者数 感染者数	300	注 27 図 6 (削減なし)
21	F	2020b、図4	感染者数	300	注 27
22	F	2020b、図5	感染者数	130	図 6 (2割削減)
23	F	2020b、図5	感染者数	130	図 6 (4割削減)
24	F	2020b、図5	感染者数	130	図 6 (6割削減)
25	F	2020b、図5	感染者数	130	図 6 (8割削減)

(注) 再現対象欄の 2020a は鈴木・西浦(2020a)、2020b は鈴木・西浦(2020b)を指す。シナリオ 19a、20a、21a は、それぞれ鈴木・西浦(2020a)と同じパラメータでシナリオ 19、20、21 を再現する。

図 C.2 と図 C.3 は、鈴木・西浦(2020a)の「図 4」と「図 5」の新規感染者数が感染者数で再現されることを示している。

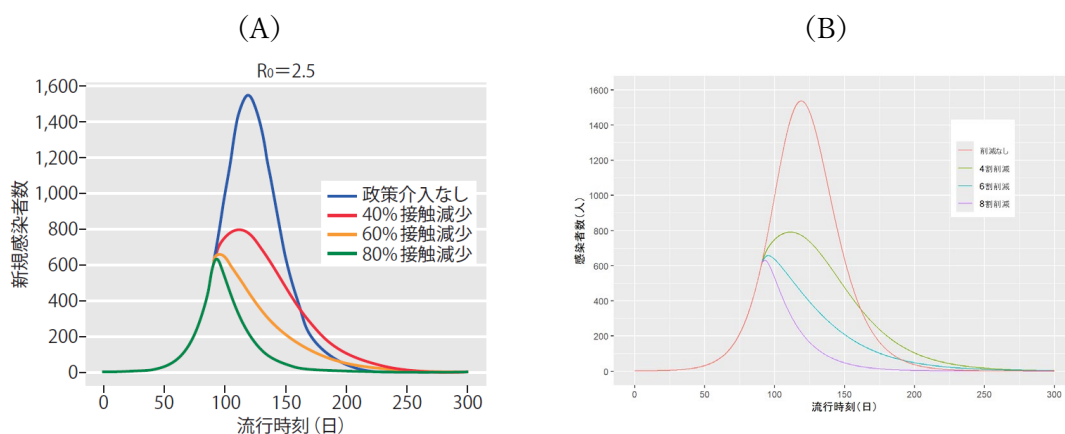
図 C.2 鈴木・西浦(2020a、図 4)の再現



(注) (A) 鈴木・西浦(2020a、図 4)

(B) 筆者計算による感染者数 (新規感染者数ではない)

図 C.3 鈴木・西浦(2020a、図 5)の再現



(注) (A) 鈴木・西浦(2020a、図 5)

(B) 筆者計算による感染者数 (新規感染者数ではない)

付録 D 区分指数モデルと SIR モデル

4.1 節で、区分指数モデルの新規感染者数と年齢構造化 SIR モデルの感染者数が高い精度で一致することを数値計算で見た。この付録では、両者の関係を理論的に解説する。D.1 節は、接触削減がおこなわれたときの区分指数モデルの解を示す。D.2 節は、接触削減割合が一定の区間内で、同質的な個人から構成される基本的な SIR モデルでの新規感染者数と感染者数が区分指数モデルと同じ動きをすることを示す。D.3 節は、接触削減割合が変化する境界では、基本的な SIR モデルの感染者数が西浦教授が示した区分指数モデルの新規感染者数と同じ動きをすることを示す。そして D.4 節では、人口が全部未感染者であるとの仮定のもとで、年齢構造化 SIR モデルが基本的な SIR モデルと同じ動きをすることを示す。以上のことから、人口のほとんどが未感染者の流行初期では、年齢構造化モデルの感染者数が区分指数モデルの新規感染者数と同じを示すことが示される。

D.1 接触削減の設定

ここでは接触削減を分析するための区分指数モデルを解説する。シミュレーションは t_0 時点から始まり、接触削減は t_1 時点で起こるとする。段階的に 4、6、8 割と削減する場合もあるが、その場合は時間の区分が増えるだけなので、ここでは数式での説明を省略する。

年齢階層で区分せず、社会は同質的な個人から構成されるとする。区分指数モデルでは、接触削減前 ($t_0 \leq t \leq t_1$) の新規感染者数 New の成長率は r_1 で、新規感染者数は

$$New(t) = New(t_0)e^{r_1(t-t_0)}$$

となり、接触削減後 ($t_1 < t$) の成長率は r_2 で、

$$New(t) = New_1e^{r_2(t-t_1)}$$

と表される。

西浦教授によるモデルでは、接触削減時点 (t_1) での新規感染者数は連続的な動きをするので、

$$New_1 = New(t_1)$$

と想定されている。

D.2 基本的な SIR モデルとの関係 (区間内)

年齢階層を区別しない同質的な個人から構成される SIR モデルとは、以下のように関係づけられる。感染者数 I の動きは、

$$\dot{I}(t) = New(t) - \gamma I(t) \quad (24)$$

で表されるとする。実効再生産数は、

$$\mathcal{R}(t) \equiv \frac{New(t)}{\gamma I(t)} \quad (25)$$

で定義される。(25)式を(24)式を代入すると、

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

が求められる。区間内で実効再生産数が一定である場合には、

$$\frac{\dot{I}(t)}{I(t)} = \mathcal{R} - 1 \quad (26)$$

となることから、感染者数は指数関数的に動く。また、(25)式から新規感染者数と感染者数は比例することになるので、新規感染者数も指数関数的に動き、変化率は同じになる。(26)式から、実効再生産数が瞬間的に低下すると、新規感染者数も瞬間的に低下することがわかる。

基本的な SIR モデルでは接触と新規感染を関係づける構造が組み込まれていて、接触削減による新規感染者数の動きは以下のように説明される。岩本(2021)をもとに、新規感染者数を、

$$New(t) = \beta(t)S(t)I(t)$$

で表すものとする。ここで、

$$\beta(t) = \beta_0 X(t)$$

とする。感染症流行のごく初期の状態、人口（1 に基準化）がほとんど未感染者として近似できると考え、 $S(t) = 1$ を代入する。また、 X は接触削減によって変化すると考え、区間の境界で接触が削減され、区間内では一定であるとする。区間内のみを考えると、感染者数の成長率は、

$$\frac{\dot{I}(t)}{I(t)} = (\mathcal{R}_0 X - 1)\gamma$$

となり、感染者数は成長率が一定の指数関数となる。各区間の成長率は、基本再生産数、平均世代時間、接触削減率の関数として表すことができ、削減率を x とすると、 $X = 1 - x$ となることから、

$$r_1 = (\mathcal{R}_0 - 1)\gamma \quad (27)$$

$$r_2 = [\mathcal{R}_0(1 - x) - 1]\gamma \quad (28)$$

となる。

橋本(2025)で公開されたスライドによれば、区分指数モデルでの成長率は(27)、(28)式に基づき、基本再生産数は 2.5、平均世代時間は 4.8 日と置いている。したがって、累積感染者数がまだ少ない時期には、同じパラメータと初期値をもつ基本的な SIR モデルの新規感染者数は、区分指数モデルによってよく近似できることがわかる。

D.3 区間の境界での新規感染者の動き

一方 SIR モデルでは、区間の境界では接触が瞬間的に低下すると、新規感染者数が瞬間的に低下することが示される。まず、接触削減時点 (t_1) 時の新規感染者数は、

$$New(t_1) = \beta_0 I(t_1) \quad (29)$$

である。接触削減後の新規感染者数は

$$New(t) = \beta_0 X_1 I(t)$$

となるので、 t_1 時点の極限をとると、

$$New_1 = \beta_0 X_1 I(t_1) \quad (30)$$

となる。感染者数は連続的に動くことから、(29)式と(30)式から新規感染者数は接触削減時に不連続に動き、接触削減割合だけ瞬時に減少することになる。

区分指数モデルで新規感染者数が連続的に動くことを SIR モデルで考えると、新規感染者数が問題のある動きをする。かりに SIR モデルで新規感染者数が連続的に動きと

$$New(t_1) = \beta_0 I(t_1) = \beta_0 X_1 I_1$$

が成立することになる。後者の 2 式から β_0 を消去して変形すると、

$$I_1 = X_1^{-1} I(t_1) \quad (31)$$

が得られる。 $X_1 < 1$ ならば、(31)式から、

$$I_1 > I(t_1)$$

となる。これは、接触削減をしたことを原因として感染者が瞬時に増加することを意味し、きわめて不自然な帰結となる。こうして、西浦教授による区分指数モデルの設定は、SIR モデルとの整合性がとれなくなる。

D.4 年齢構造化 SIR モデルとの関係

付録 A で説明したように、年齢構造化 SIR モデルは異質感受性モデルとなっていて、3 つの年齢階層は感受性（感染しやすさ）が異なっているが、その他は同質的である。次世代行列は同じ列ベクトルからなる特異行列であり、その固有値は 2.5（基本再生産数）、0（重根）となっている。このため、人口が全部感受性人口であるとの仮定で年齢構造化 SIR モデルを近似すると、動学は 1 次元の微分方程式に縮退し、年齢階層を分けない基本的な SIR モデルに等しくなる。

したがって、感染者数の初期値が同じであれば、この年齢構造化 SIR モデルの感染者数は、基本再生産数が 2.5 の基本的な SIR モデルの感染者数と同じ動きをする。区分指数モデルでの基本再生産数と平均世代時間は付録 A で解説したコードと同じ値が設定されていることから、付録 A で説明した年齢構造化モデルの感染者数は、基本的な SIR モデルの感染者数、さらには区分指数モデルの新規感染者数と同じ動きをすることになる。