

CIRJE-J-310

「接触8割削減」の検証可能性

東京大学大学院経済学研究科
岩本 康志

2024年5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。

Verifiability of “Reducing Contact by 80%”

Yasushi Iwamoto

Abstract

This paper discusses issues related to the verification of the "reducing contact by 80%" policy implemented during the first state of emergency declaration, utilizing a logic model to show the relationship between the policy (output) and its outcome. The focus of this paper is not on verifying the effect itself, but on examining the structure that makes it difficult to validate the mathematical model on which the 80% contact reduction was based.

This difficulty stems from the unclear and unobservable concept of what "contact" refers to in the real world. This structure simultaneously leads to difficulties in implementing contact reduction measures in practice. Since contact cannot be directly observed, the inconvenience arises that, if the mathematical model is assumed correct, a failure to reduce new infections by 80% could be interpreted as insufficient effort by the general public. This approach can be described as outcome-based epidemic control.

During the state of emergency, an attempt was made to validate the model using human mobility and contact rates with contact frequency as an observable outcome. However, the model could not be validated due to inconsistencies with the original plan. Additionally, the ex-post analysis by Prof. Nishiura's team abandoned the validation of the model because they used a different model than the one on which the contact reduction was based. The recommendation for 80% contact reduction presented the analytical results in which the variables in the original model were mistaken. It would have been possible to correct this and validate the original model, but that path was not taken.

「接触 8 割削減」の検証可能性

岩本 康志

要 約

本稿は、第 1 回の緊急事態宣言のもとでとられた「接触 8 割削減」の検証に関する課題を、政策（アウトプット）とその成果（アウトカム）の関係を示すロジックモデルを援用して、検討する。本稿が対象とするのは効果の検証そのものではなく、接触 8 割削減の根拠とされた数理モデルの検証が困難になっている構造に焦点を当てる。

これは、接触が実社会の何を指すのかが明確ではなく、観測できないことから生じる。この構造が同時に接触削減を実際に社会に実装することの困難にもつながる。接触が観測できないことから、「数理モデルが正しいとすれば」新規感染者が 8 割減少していないと、一般市民の努力が足りなかったと結論づけられるという不都合が生じる。いわば、成果主義の防疫である。

緊急事態時に人流と接触率を用いて接触頻度を観測可能なアウトカムとしてモデルを検証する試みがおこなわれたが、当初の構想に問題がありモデルは検証できなかった。また、西浦教授のチームによる実績データの分析では、接触削減の根拠となったモデルではなく別のモデルを使用したため、モデルの検証は放棄された。接触 8 割削減が提言された際にはモデルの変数を取り違えた分析結果が示されていた。それを訂正して当初のモデルを検証することも考えられるが、その道はとられなかった。

1. 序論

新型インフルエンザ等対策特別措置法に基づく、はじめての緊急事態宣言が解除された2020年5月25日の記者会見¹で、安倍晋三首相は対策の検証についての質問に対し、「本格的な全体の検証というのは、これは終息した後、検証していきたいと思っています。」と答えた。同席した尾身茂新型インフルエンザ等対策有識者会議基本的対処方針等諮問委員会会長も「私、専門家の立場としては、これが、今、総理がおっしゃったように、最終的に終息した時点でしっかりとした検証が必要だと思います。」と発言している。

本稿は、第1回の緊急事態宣言のもとでとられた「接触8割削減」の検証に関する課題を検討する。すべての国民に影響を与えた対策であり、その効果の事後検証は重要な研究課題である。しかし、本稿が対象とするのは効果の検証そのものではなく、接触8割削減の根拠とされたモデルの検証が困難になっている構造に焦点を当てる。

対策の根拠として事前に設定されたモデルと実績を照合して、モデルを事後的に検証することは、科学としても政策としても重要な作業である。科学的側面としては、モデルが現実にとどの程度当てはまっているかを検証することで、モデルの選択や改良に貢献する。政策の側面では、政策が目的を達成しているかを評価することに貢献する。政策評価制度における目標管理型評価では評価対象施策の事前分析表を作成し、事前に期待される政策効果を示すことを求めている。これによって、結果を見てからそれを政策の効果であると説明して、当初の目的を達成していない政策を正当化することを防ごうとしている。事前分析表に政策（アウトプット）とその成果（アウトカム）の関係を示すロジックモデルが示されていれば、ロジックモデルが現実に妥当するかどうかを検証できる。

接触8割削減については、2020年4月7日の緊急事態宣言発出時に数理モデルによって事前に期待される政策効果が定量的に示されている。したがって、政策評価制度での事前分析表のように、事後検証をする環境は整っている。事前（緊急事態宣言発出時）に期待された効果とは、接触8割削減によって積極的疫学調査（クラスター対策）ができる水準まで新規感染者数が低下することを1か月以内に確認することであった。しかし、期間内の目標達成は難しくなっていた。緊急事態宣言発出時の接触削減目標は「最低7割、極力8割」とされていたが、政府関係者から7割の言及が消え、8割が目指されるようになった²。そ

* 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）21K01522 の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表したい。

¹ https://www.kantei.go.jp/jp/98_abe/statement/2020/0525kaiken.html

² 「新型コロナウイルスの早期終息のため、安倍晋三首相が掲げる、人と人との接触機会の「最低7割、極力8割」削減について、政府側から「最低7割」の発信が消えた。7割削減だと感染抑制のペースが緩み、5月6日までの緊急事態宣言の期間を延長しなければならなくなる可能性があるため、判断の時期が迫るなか、政府は8割削減の周知に必死だ。」（「言

して、新規感染者は減少したものの、当初の緊急事態の期間の 1 か月では目標が達成したことが確認できるにはいたらず、5 月 4 日に緊急事態は 31 日まで 1 か月弱延長された。その後、緊急事態は前倒して解除され、5 月 25 日にすべての都道府県で解除された。当日には全国の新規感染者数が 50 人を下回り、安倍首相は「我が国では、緊急事態を宣言しても、罰則を伴う強制的な外出規制などを実施することはできません。それでも、そうした日本ならではのやり方で、わずか 1 か月半で、今回の流行をほぼ収束させることができました。正に、日本モデルの力を示したと思います。」と、対策の成果を誇示した。しかし、当事者の記録（西浦・川端 2020、西村 2022、尾身 2023）や第三者による事後検証（アジア・パシフィック・イニシアティブ 2020、新型コロナウイルス感染症対応に関する有識者会議³）には、なぜ当初に期待された結果にならなかったのかの視点からの考察は見られない。

本稿では、接触 8 割削減については、その根拠の妥当性を検証することが困難であることを指摘する。この問題は同時に、接触削減を実際に社会に実装することの困難にもつながる。このような問題を、ロジックモデルを援用して特徴づける。感染症数理モデルで関係づけられている感染と接触について、新規感染者数は実際のデータが収集されている一方で、接触は抽象的な概念であり、実社会の何に対応するかが明確ではない。一般市民は何をすればよいのか、具体的な対策がつかめないことから、社会実装が困難になる。そして、接触というアウトカム指標が観測できず、実績も評価できないことで、モデルの検証ができなくなっている。

そこで、観測可能なアウトカム指標を設定することが重要となる。じつは、そのような試みは対策の実施中におこなわれた。しかし、その枠組みは構築できずに終わった。また、緊急事態解除後に実績データに基づく分析もされたが、当初のモデルは用いず、最初からモデルの検証は放棄されていた。本稿では、これらの検証ができなかった原因を考察する。

本稿の構成は、以下の通りである。2 節は、英国で提案された対策と対比させることで、日本の対策で接触の概念の実社会への対応が曖昧なことが社会実装を困難にすることを示す。また、本稿の分析枠組みに沿って、接触、外出、人流の概念を整理する。3 節はロジックモデルを用いてアウトカム指標が観測不能であることに由来する問題点をのべる。事後検証の試みを検討する 4 節と 5 節は、それぞれ緊急事態宣言中におこなわれた検証作業、緊急事態解除後に実績データを用いた分析を対象とする。付録では、5 節で紹介した研究のモデルの技術的詳細を説明する。

本稿は数理モデルを対象とするが、数理モデルの展開は必要最小限とし、技術的な詳細に

わなくなった「最低 7 割」減 安倍首相 軌道修正の理由は」毎日新聞、2020 年 4 月 23 日）
<https://mainichi.jp/articles/20200423/k00/00m/040/186000c>

³ 「新型コロナウイルス感染症へのこれまでの取組を踏まえた次の感染症危機に向けた中長期的な課題について」（2023 年 6 月 15 日）

https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/coronavirus_yushiki/pdf/corona_kadai.pdf

立ち入らずに自然言語での記述で十分に理解できるように構成されている。しかし、若干の数式を使用することは、概念を明確にでき、とくに自然言語による概念の混乱が生じていることを示すためには有益である。こうした目的で数式を使用した小節は「*」をつけているが、これらの小節を飛ばして読んでも構わない。

なお、本稿は 2020 年の事態を中心に記述しており、年号の指定のない日付は 2020 年を指す。

2. 社会実装の課題

2.1 日本方式と英国方式

接触 8 割削減は、(1)新規感染者を積極的疫学調査（クラスター対策）が可能となる水準まで低下させることを目的に、(2)そのために新規感染者の 8 割削減が必要で、(3)そのために接触の 8 割削減が必要である、という論理構成をとっている。このうちの新規感染者の必要な削減割合が 8 割であることは数理モデル分析から導かれたとされているが、岩本 (2023a、2023b)では、それは妥当しないことが示されている。しかし本稿では、この問題は措いておき、接触 8 割削減を実行することの課題を検討する。2 節では社会実装の課題を検討する。

日本での接触機会削減の取り組みは、そもそも「接触」とは実社会の何を指すのかが示されておらず、手段が抽象的になっている。このことを見るために、英国で Ferguson et al. (2020)が提唱した対策（以下「英国方式」と呼ぶ）と比較しよう⁴。表 1 は、5 月 1 日の新型コロナウイルス感染症対策専門家会議資料に掲載された英国方式の内容である。有症状者の自宅隔離、有症状者の家族の自宅隔離、70 歳以上の社会的隔離（social distance）、全国民の社会的隔離、学校閉鎖、を対策の選択肢として、それぞれの接触削減率が示されている。

表 1 Ferguson et al. (2020)で示された公衆衛生的介入手段

【検討されている非薬物的介入策の概要】

	対策 (policy)	概要
①	有症状者の自宅隔離	有症状者は 7 日間自宅隔離、家庭外の接触を 75%減らす。家庭内の接触は変化なし。70%の家庭がこの対策を遵守することを想定。
②	自発的な家庭隔離	有症状者の家族全員が 14 日間自宅隔離。期間中は家族内の接触は倍に。地域 (community) 内の接触は 75%減。50%の家庭がこの対策を遵守することを想定。
③	70 歳以上の社会的距離戦略	職場における接触を 50%減らし、家庭内の接触を 25%増やし、他の接触を 75%減らす。この対策は 75%遵守されることを想定。
④	全国民の社会的距離戦略	家庭外、学校・職場以外における接触を 75%削減。学校内の接触は変化なし。職場での接触を 25%削減。家庭内の接触は 25%増加することを想定。
⑤	学校と大学の閉鎖	全ての学校を閉鎖し、25%の大学のみ運営。生徒の家族との接触は閉鎖期間中に 50%増加、地域における接触は 25%増加する想定。

(出所)「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 5 月 1 日)

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/novel_coronavirus/senmonkakaigi/sidai_r020501_1.pdf

⁴ Ferguson et al. (2020)は新型インフルエンザを対象にした Ferguson et al. (2006)のモデルを COVID-19 に応用したもので、2020 年 3 月 16 日に発表され、それまで集団免疫を指向していた英国がより積極的な対策に転換することに影響を与えた。

英国方式は、活動場所に応じて対策の目標値を設定するとともに、遵守率も考慮している。また、外出を控えると家庭内の接触が増えるという、日常生活に起こり得ることを想定している。一方、日本での「接触8割削減」（以下、「日本方式」と呼ぶ）は、細分化はせず、包括的に8割削減を掲げて、それを実施することにした。英国方式は曖昧な部分が残るとしても、日本方式よりも具体的で、実践しやすい配慮がされている。

日本方式では、接触とはどういうものか曖昧である。モデルは現実の現象を抽象化・単純化したモデルでの接触の概念をそのまま持ち込んできており、接触とは実生活でのどのようなものを指すかが明確ではない。当時の状況を、西村康稔新型コロナウイルス感染症対策担当大臣は「人との接触を8割減らす」ということがわかりにくい、具体的にどういう行動をお願いすればいいのか、など確かに安倍総理も私も悩みました。」と振り返っている（西村 2022、24頁）。

接触8割削減を唱えた西浦博教授は4月17日の専門家有志の会 Note で、接触について「今回のコロナの対策に限った新たな目安として、
「一人の人が相手と1m以内の距離で2～3往復の会話をしたら、1接触と数える」
「一人の人が相手と握手をしたら、1接触と数える」
と考えることを提案します。」と説明している。そして、「世界各国でも試行錯誤しながら様々な説明を考案しています。この「1接触」の考え方も、急ごしらえで未熟ですが、参考になれば幸いです。」と、モデルと実生活の対応が未熟であることを表明している⁵。モデルでの抽象化された接触が感染と関係をもつとしても、実生活での対応が不明確であると、対策として実装しにくい。これが英国方式と日本方式の大きな違いであり、日本方式の難点である。

また、Ferguson et al. (2020)は、対策を組み合わせることで多くの選択肢を示しているのに対し、日本方式は目標を実現する対策の提示がないことから政策担当者には対策の選択肢も与えられていない。

2.2 接触と外出・人流

ここで、本稿の課題に関係する概念の相違を整理しておく。数理モデルでは接触によって感染が生じ、両者は比例的な関係（接触が8割減少すれば新規感染が8割減少する）があるとされるが、モデルでの接触と感染は抽象的な概念である。感染の発生は現実の新規陽性者の発生で観測することができるが、接触は直ちには観測できずに、抽象的な概念にとどまる。対策の具体的手段としては、新型インフルエンザ等対策特別措置法では外出自粛の要請

⁵ 西浦博「『人との接触』ってどうやって数えればいいのか？」

<https://note.stopcovid19.jp/n/n1d0745601527>

があげられており⁶、不要不急の外出を控えることが呼びかけられた。このため、接触削減は外出削減と解釈されやすいが、政府や感染症専門家は「外出8割削減」を発信してはいない。したがって、接触と外出はかならずしも比例的な関係で結びつけられるわけではない。感染につながる接触を避ける手段には、外出自粛だけでなく、社会的隔離(social distance)等、他の手段も考えられるからである。接触に関する概念で実際に計測されるデータとしては、人流データが注目された。

本稿では、感染削減に関する概念を、抽象的な概念として接触削減、具体的な行動となる外出削減、データで観測する人流削減、と整理することにする。以下では、EBPMの取り組みで使用されるロジックモデルを用いて、これらの概念を関係づける。

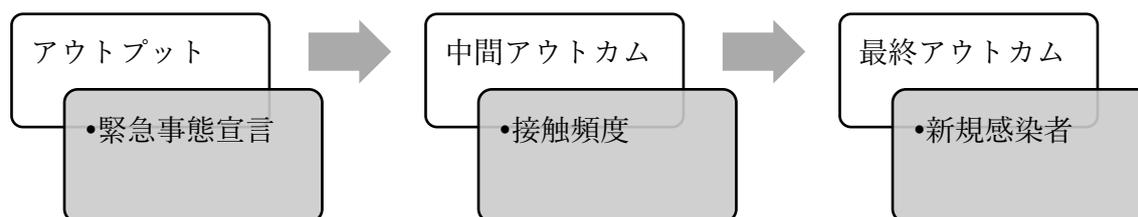
⁶ 第45条第1項。

3. モデルの検証の課題

3.1 観測不能なアウトカム指標

図1は、最近のEBPMへの取り組みで用いられているロジックモデルを用いて、接触8割削減の政策効果の経路を表している。ロジックモデルとは、政策が目的を達成するための因果関係を、政策（アウトプット）と政策の成果指標（アウトカム）との関係として表したものである。感染症対策である公衆衛生的介入（non-pharmaceutical intervention）をアウトプットととらえると、英国方式は表1のような具体的な手段のメニューとなるが、日本ではそのような具体的な手段はないので、緊急事態宣言が対応する。そして、接触8割削減を達成する手段は一般市民に委ねられているので、接触頻度はアウトカムととらえられる。図1では、緊急事態宣言（アウトプット）によって、接触頻度（中間アウトカム）が削減され、新規感染者（最終アウトカム）が抑制されるという因果関係に沿って、政策が目的を達成する流れを示している。

図1 接触8割削減のロジックモデル



日本方式の実装可能性の問題は、検証可能性の問題に結びつく。接触頻度が数理モデルに基づいた抽象的な指標であるため観測できないと、接触8割削減が達成されたかどうかも観測できない。このとき、「数理モデルが正しいとすれば」新規感染者が8割減少していなければ、接触削減が足りなかったことになる。つまり、感染8割削減が目標にされ、どのように努力すればよいか提示されないまま、目標が達成されなければ一般市民の努力が足りなかったと結論づけられることになる。

しかし、数理モデルが現実の流行の動きを正しく表していることは保証されていない。モデルは現実の近似であり、モデル通りにならない可能性には、さまざまなものが考えられる。たとえば、接触が全体的に削減されていても感染につながる接触が削減されていない可能性や、モデルの構造が現実の接触と感染の姿を正しくとらえられていないという可能性がある。近似誤差が大きい場合には、接触削減と感染削減の関係がモデル通りにはならず、接触削減が達成されても感染削減が達成されないかもしれない。このとき、一般市民の努力が

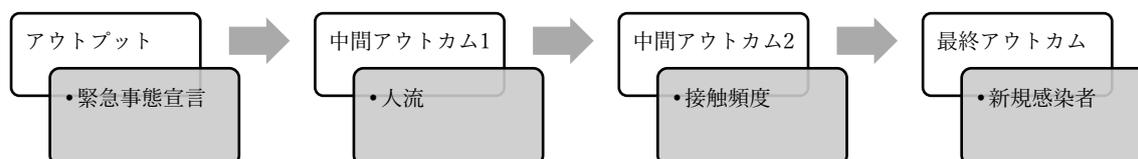
足りないと思われられることは不都合なものとなる⁷。

3.2 人流データによる検証

このような不都合を避けるために、モデルを検証可能なものとすることは重要である。数理モデルが正しいかどうかの検証は、中間アウトカムと最終アウトカムの関係を具体的にとらえて、それを観測することによって実行できる。英国方式ではアウトプットが具体的な手段として記述されていて、そのアウトプットと最終アウトカムが数理モデルで関係づけられているので、それらを観測することによってモデルが妥当なものか否かを検証することができる。しかし日本方式では、観測できない中間アウトカムが設定されているため、モデルの正当性をそのままでは検証することができない。そこで、観測可能な中間アウトカムとして人流を加えることで、モデルの正当性を検証することが考えられた。

図2は、第1段階の中間アウトカムとして人流を加えたロジックモデルであり、人々の行動の目標が人流の削減の形で可視化され、数理モデルの因果関係を人流と新規感染者の関係を見ることで、政策効果の検証に一步近づいた⁸。

図2 接触8割削減のロジックモデル（人流を含む）



3.3 密度依存接触と頻度依存接触

人々が外出することから接触が生じ、感染を生じるというロジックモデルに沿って考えよう。ここで問題となるのは、感染症数理モデルでは接触の様式についての唯一の正しい設定が定まっているわけではなく、様々なモデル化が考えられることである。したがって、現実の人流データと接触の関係は、モデルの設定を適当に変えることで説明することが可能になってしまう。その場合、モデルが現実に妥当するかどうかは検証できなくなる。

⁷ 独立行政法人制度では、行政サービスの効率化を図る意図から、法人に対して成果目標を課して、その達成手段は法人の裁量とする仕組みをとる。ここでは経営者が法人業務についての専門的知識を有していて、政府の官僚よりも法人を運営する能力に秀でていることが前提となる。この前提とは異なり、感染症対策に熟知していない一般市民に成果目標を課して、その達成手段は裁量とする仕組みは適当であろうかが問題となる。

⁸ しかし、人流の計測は各所でおこなわれていて、場所によって人流削減率が異なっているため、人流削減目標が達成されたか否かの判断基準は曖昧さを残す。

この問題を理解するには、数理モデルでの接触の具体的な定式化を見ることが有益である。多様な定式化があるが、以下の代表的な2つの定式化が対比される。1つは、接触数が人口密度に比例して増加する「密度依存」(density-dependent、あるいは質量作用の法則 law of mass action)、もう1つは人口密度に依存しない「頻度依存」(frequency-dependent、あるいは標準発生率 standard incidence)である⁹。実生活の例として、外出して公園に行くことを考えよう。公園を散歩して人とすれ違うことが密度依存の例で、公園にいる人が増えると接触が増えることになり、公園の人口密度と接触が関係している。一方、誰かと待ち合わせてその人と公園ですっと過ごすことが頻度依存の例であり、公園にいる他の人は接触とは関係ないので、公園の人口密度と接触とは関係なく、外出の頻度が接触に関係している。

頻度依存では、接触8割削減は外出8割削減に対応する。一方、密度依存では、外出が6割削減すると、外出当たりの接触数も6割削減し、接触数は8.4割削減される。8割削減するには、外出は5.5割削減すればよい¹⁰。より現実的な設定はこの両者の間にあり、外出当たりの接触数の削減率は0(頻度依存)から外出当たりの接触数(密度依存)の間にあると考えられる。

5月1日の専門家会議資料の説明では、接触は「接触頻度」、外出は「人流」、外出当たり接触数は「接触率」と呼ばれたので、本稿ではこの用語を用いる。接触8割削減の実現を計測する指標は、「接触頻度＝人流×接触率」となる。

新規感染者数は接触頻度に比例すると考えると、「新規感染者 \propto (人流×接触率)」となる。したがって、削減率については、

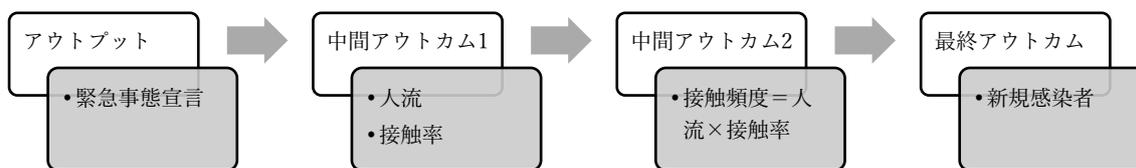
$$1 - \text{新規感染者削減率} = (1 - \text{人流削減率}) \times (1 - \text{接触率削減率}) \quad (1)$$

の関係がある。接触率が観測できるようになると、図3のように接触頻度が観測可能となるロジックモデルを構築できる。かりに接触頻度が削減されても感染が減少しなければ、モデルの想定がおかしかったことになるので、モデルの検証への道が拓ける。

⁹ Begon et al. (2002)は、感染(伝播、transmission)の様式について密度依存、頻度依存の用語を用いた。本稿では感染と接触が比例するとの想定で、接触の様式についてこの用語を用いる。質量作用の法則、標準発生率の用語は、稲葉(2020)に見られる。

¹⁰ 正確に接触が8割削減となる外出削減率 x は、 $(1-x)^2 = 1 - 0.8$ を解いて、 $x = 1 - \sqrt{0.2} \approx 0.55$ と求められる。

図3 接触8割削減のロジックモデル（人流と接触率を含む）



3.4 接触削減の分解*

基本的な SIR モデルに「接触頻度 = 人流 × 接触率」の関係を導入すると、新規感染者 New と接触頻度の関係は、

$$New(t) = (1 - x_1(t))S(t)(1 - x_2(t))\beta_0 I(t) \quad (2)$$

と表される¹¹。ここで x_1 は西浦教授の用語法に合わせて人流削減率、 x_2 は、（やや紛らわしくなるが）接触率削減率と呼ぶことにする。 β_0 は接触率（transmission rate。一般的には感染率、伝播率と訳されるが、上述の専門家会議資料の用語法に合わせる）、 S は未感染者、 I は感染者を表す。

人流削減率と接触率削減率が 0 のときの新規感染者数 New_0 は、

$$New_0(t) = \beta_0 S(t) I(t) \quad (3)$$

となる。(3)式を(2)式に代入すると、

$$New(t) = (1 - x_1(t))(1 - x_2(t))New_0(t)$$

となる。これを变形すると、

$$\frac{New(t)}{New_0(t)} = 1 - \frac{New_0(t) - New(t)}{New_0(t)} = (1 - x_1(t))(1 - x_2(t))$$

となり、(1)式が得られる。

1 人の感染者から生じる新規感染者の数（実効再生産数） \mathcal{R} は、

$$\mathcal{R}(t) \equiv \frac{New(t)}{\gamma I(t)} \quad (4)$$

と定義される。これに(2)式を代入すると、

¹¹ 当時の 42 万人死亡推計や接触 8 割削減で使用されていた SIR モデルは、人口を小児（0-14 歳）、成年（15-64 歳）、高齢者（65 歳以上）に 3 分した年齢構造化モデルである。そのソースコードが、https://github.com/contactmodel/COVID19-Japan-Reff/blob/master/BerkleyMadonna_May2020.txt で公開されている。岩本(2023b)は、このモデルの詳細を解説している。年齢階層の区別の有無による数値の差は本稿の論点に本質的な影響はないので、本稿では説明の簡単化のため、年齢階層の区別をしないモデルを用いる。

$$\mathcal{R}(t) = (1 - x_1(t))(1 - x_2(t))\frac{\beta_0}{\gamma}S(t)$$

となる。ここで、 γ は感染者が感染性をもつ期間の逆数（平均世代期間）である。基本再生産数 \mathcal{R}_0 は、

$$\mathcal{R}_0 = \frac{\beta_0}{\gamma} \quad (5)$$

と定義される。2020年春の日本は累積感染者数が小さく、 $S(t) \approx 1$ で近似できるとすれば、(5)式を(4)式に代入して、

$$\mathcal{R}(t) = (1 - x_1(t))(1 - x_2(t))\mathcal{R}_0$$

と考えることができる。

密度依存接触を想定した場合は、全員の人流が等しく削減されると新規感染者の発生を表す(2)式は、

$$New(t) = (1 - x_1(t))S(t)\beta_0(1 - x_1(t))I(t) = (1 - x_1(t))^2\beta_0S(t)I(t) \quad (6)$$

と変化し、(3)式を代入すると、

$$New(t) = (1 - x_1(t))^2New_0(t)$$

となる。人流削減率は2乗の形で新規感染者数に影響を与える。あるいは、接触率が人流と同じ率で低下するとも解釈できる。実効再生産数も、(4)式に(5)式と(6)式を代入して、 $S(t) \approx 1$ と置くことで、

$$\mathcal{R}(t) = (1 - x_1(t))^2\mathcal{R}_0$$

となる。

頻度依存接触を想定した場合は、新規感染者の発生を表す(2)式は、

$$New(t) = (1 - x_1(t))S(t)\beta_0\frac{(1 - x_2(t))I(t)}{(1 - x_2(t))N(t)} = (1 - x_1(t))\beta_0S(t)\frac{I(t)}{N(t)} \quad (7)$$

と変化し、(3)式を代入して、 $S(t) \approx 1$ で近似できるとすれば、

$$New(t) = (1 - x_1(t))New_0(t)$$

となり、感染減少率は人流削減率となる。また、接触率が人流に依存しないとも解釈できる。実効再生産数も、(4)式に(5)式と(7)式を代入して、

$$\mathcal{R}(t) = (1 - x_1(t))\mathcal{R}_0$$

となる。

4. 検証作業 (1)：期中評価

緊急事態宣言発出後に、人流と接触率を計測することで、モデルを検証することが試みられた。その試みは、4月22日の専門家会議、4月24日のメディアとの意見交換会、5月1日の専門家会議で説明されている。政策の実行中の評価であるので、このような検証は期中評価と呼ばれる。その経緯を追うと、以下でのべるように、どのような接触の定式化を想定しているのか、どのように計測するのかの説明に混乱が見られる。以下では、5月1日の説明に準拠してそれ以前の説明を整理することによって、検証作業の流れをわかりやすく整理する。また、変数の呼称が変更されたりして、直ちに理解しにくいので、揺れの見られる呼称については説明当時のものと5月1日のものを併記する。

結論を先にのべると、検証作業の当初の構想に問題があり、モデルは検証できないで終わった。具体的には、すでに利用可能な人流データに加えて接触率の変化を新たに計測しようとしたが、開発していた計測手法が接触率一定を前提としたものだったため、接触率の変化を考慮した計測ができなかった。

4.1 密度依存に基づく説明 (4月22日、4月24日)

4月22日の「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」¹²の以下の記述では、接触8割削減の実現を計測する指標は「接触頻度＝人流×接触率」となることが示され、接触率の変化を想定しているが、その定量化は検討途上とされている（なおこの段階では、接触頻度は接触と呼ばれている）。

「接触行動の変容は、主に2つの指標に基づいて評価をする予定である。その1つは、都市部などの人口サイズ（以下「人流」という。）そのものの減少を直接的に評価するものである。（中略）

2つ目の評価は接触率（時間当たりの接触数）そのものであり、現在、その定量化に向けた検討を開始している。」（4-5頁）

密度依存接触の場合は、人流減少率と接触減少率は同率で減少するので、人流データが計測されれば、接触頻度の減少率を推定できる。現実の接触は密度依存とは限らないので、接触率も別途、計測する必要がある。

西浦教授は4月24日のメディア向けの意見交換会で、4月22日資料と呼応する内容の説明をおこなっている（図4）¹³。西浦・川端(2020)は、この説明を以下のように記述して

¹² <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000624048.pdf>

¹³ 北大・西浦教授「8割接触削減」評価の根拠について説明（2020年4月24日）

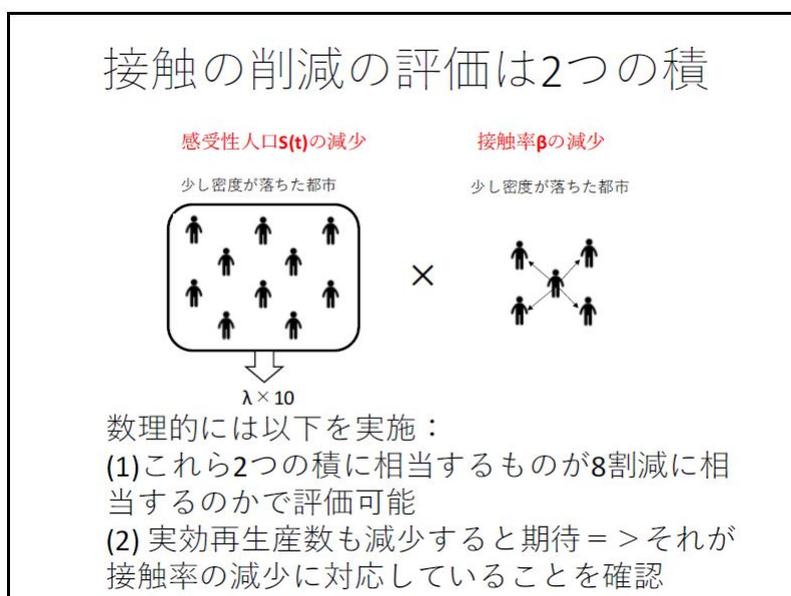
<https://youtu.be/0M6gpMlssPM>

いる（このときには、人流を「感受性人口」と呼んでいる）。

「感受性人口の減少」と「接触率の削減」があり、これらをかけ合わせた積が「8割削減」に達していればよいという考え方を示した。

これらの指標は、NTTドコモのモバイル空間統計などを活用して推定できると考えられていた。前者「感受性人口の減少」については「人流データ」、後者「接触率の削減」については、「500m×500m」のメッシュの中で、年代別、性別を区別した上で「どのくらいの時間を、互いに共有していたか」というデータから換算することを試みていると明かした、」（川端裕人氏による記述、191頁）

図4 感受性人口と接触率の減少（4月24日資料）



（出所）「接触の8割減、どう評価？」西浦北大教授が解説」（m3.com）

<https://www.m3.com/news/open/iryoshin/761816>

このときの接触率の説明では、Zagheni et al. (2008)に由来する式が提示されている¹⁴。ただし、4.2節で説明するように、この式自体は頻度依存接触によるものであり、それとは異なる接触様式を想定した接触率に当てはめることには方法論上の矛盾を抱えていた。

なお、このときの投影スライドでは、接触頻度を接触率と同一視しているが、後の5月1日の説明での用語法（接触頻度と接触率は別種のものとした）とは齟齬が生じる。

¹⁴ <https://youtu.be/0M6gpMlssPM?t=2343>

4.2 Zagheni et al. (2008)による接触率の観測*

Zagheni et al. (2008)は人口を年齢階層で区分し、時間と場所ごとの滞在データをもとに、年齢階層別の接触を構成している。西浦教授の検証作業の構想は、この時間と場所ごとの滞在データとして、NTTドコモのモバイル空間統計を使用するものであった。

ある時間にある場所にいる年齢階層*i*の人口を*k_i*とする。その時間にその場所にいる人数の合計は、 $k \equiv \sum_i k_i$ である。年齢階層*i*と年齢階層*j*の接触頻度*t_{ij}*は、

$$t_{ij} \equiv k_i \times \frac{k_j}{k}$$

と定義される。これは、Zagheni et al. (2008)の(1)式の時間と場所の添え字を省略したものに対応する。すべての個人が一律に*x*の率で外出を削減したとすると、接触頻度は、

$$t_{ij} \equiv (1-x)k_i \times \frac{(1-x)k_j}{(1-x)k} = (1-x) \times k_i \times \frac{k_j}{k} \quad (8)$$

となり、*x*の率だけ削減される。つまり、接触頻度削減率は人流削減率に等しくなる。(8)式は、頻度依存接触の(7)式と同様の構造をしており、頻度依存接触の性質が現れている。したがって、Zagheni et al. (2008)の定式化は頻度依存と密度依存を含む一般的な様式ではないため、データによって接触の様式を識別する目的には使用できない。

4.3 頻度依存に基づく説明 (5月1日)

5月1日の専門家会議での資料と会議後記者会見では、4月24日に説明されたZagheni et al. (2008)に基づく指標が、接触率から人流に変更された¹⁵。ただし、この変更が明示的に説明されておらず、説明の全体像が非常にわかりにくくなっている。

資料¹⁶では「接触率（一人当たりが経験する単位時間当たりの接触頻度）と人流（都市部の人口サイズ）の積に相当する接触行動の変容（以下「接触頻度」という。）」を評価するとしており、従来通りの「接触頻度＝人流×接触率」に基づく説明となっている。接触率の変化を考慮することを目指しているものの5月1日段階では開発できていないため、接触率の変化を考慮せず、実質的に「接触頻度＝人流」の想定で計測したことになった。このことは、以下のように、わかりにくい形で説明されている。

¹⁵ 政府の専門家会議 感染者減でも「外出自粛などの継続」提言（2020年5月1日）

<https://youtu.be/pnh1Kw4ozhM>

「平日昼・30歳以上、通勤で「8割削減」達成ならず」（m3.com）

<https://www.m3.com/news/open/iryoishin/765967>

¹⁶ 「2020年5月1日の専門家会議での報告内容の補足」（厚生労働省コロナ対策本部クラスター対策班）

https://github.com/contactmodel/20200501/blob/master/0501_public.pdf

「密度の高い地区では一人が接触する人数が多くなることが考えられるが、そのような接触の密度効果は十分な情報がなく考慮されていない。」(5月1日資料、9頁)

これは、接触率が密度に依存することを考慮しないという意味であり、頻度依存を想定していることに等しい¹⁷。頻度依存を前提とする Zaghani et al. (2008)の手法を頻度依存を前提とする評価に適用したことになるので、素直な適用である。したがって、4月22日段階で構想されていた、密度依存を前提とした計画には無理があったと言える。

4.4 検証不能なモデルがもたらす問題

この期中評価の試みのなかに、3.1節で説明した問題が現れてくる。期中評価を試みた後でも、人流データを観測しても接触は観測できていない。このとき、感染者と新規感染者の動向が理論値通りに推移しなかった場合、対策の根拠が誤っていた(数理モデルと現実が対応していない)のか、一般市民の努力が足りなかったのか、を判別できない。

しかしモデルでは、接触率削減率が未知パラメータになっているため、現実の新規感染者とモデルの予測値が一致するように、この未知パラメータを設定することが可能になる。かりにモデルの定式化に沿った接触率削減率が観測できたとすると、それと感染症の流行動向を照合することでモデルの妥当性を検証することができる。しかし、接触率削減率は観測されていない。緊急事態宣言発出前から実効再生産数は低下傾向に転じているので¹⁸、かりに人流が感染機会とほとんど関係なく、外出自粛に意味がなかったとしても、人流の減少と新規感染者の減少の疑似相関が生じてしまい、外出自粛が正当化されてしまうかもしれない。

モデルが検証可能でなく、感染機会につながる接触を削減する方法も具体的に示されないうまま、一般市民は成果指標の達成を求められる構図となった。目的とした成果が現れない場合は、モデルが正しいとの前提で、接触削減努力が足りないのみなされることになる。西浦教授は5月1日の記者会見で、「十分な減少を果たすためには、実効再生産数0.5にすることを目標にしているのです、それには達していないということだ」と発言している¹⁹。この

¹⁷ 結果的に4月24日は、人流に対応する指標を誤って接触率に対応させた説明をおこなっていたことになる(4月22日資料も同様である)。このため、本来人流であるものが接触頻度であり、かつ接触率である、という矛盾した説明になってしまった。5月1日の説明でこの矛盾が訂正されたことになるが、訂正したことを明示的に説明していないため、正しい姿がわかりにくくなっている。

¹⁸ 「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」(図3、図4。2020年5月22日、新型コロナウイルス感染症対策専門家会議)

<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000627254.pdf>

¹⁹ 「厚生労働省クラスター対策班に参加する西浦博・北海道大教授(理論疫学)は、1を下

発言は情勢を客観的に説明しているものだが、ではどうすればよいかを考えると、一般市民が努力するしかなく、西浦教授にその意図がなくても暗に一般市民を責めてしまう構図になる。すると、そのことの反発も生じる²⁰。

モデルを検証する作業は進行途上にあり、「走りながら考えている」状態であったと言える。緊急を要する事態であれば、完成されたモデルに基づいて政策を実施すべきであると断じることは適切ではない。ただし、このような未成熟な論理構成のもとで政策が実行されたことは、当時の状況をあらためて検証しようとする際には認識しておくべきである。

回ったのは全国も東京も緊急事態宣言が出る前の4月1日ごろだったと説明。そのうえで、「1を割るだけでは感染者数を十分に減らすことには足りない。全国的にみると、8割の接触機会の削減で求めている水準には達していない」と指摘。目標とする0.5以下になることを確認していく必要があるとした。」(感染者減「期待に至らなかった」 専門家会議の分析は[新型コロナウイルス]、朝日新聞デジタル、2020年5月2日)

<https://www.asahi.com/articles/ASN516TKMN51ULBJ014.html>

²⁰ 篠田英朗教授は、専門家会議メンバーが「減少はしているが期待したほどではない」と評価したことに対して、「違和感が残る。いったい誰が、いつ、どういう「期待」をしていたのか？ 国民にその「期待」に関する説明は事前に与えられていたのか？ わずか一週間という時間は、「まだわからない」を「期待したほどではない」という評価に変更するのに、適切かつ十分だったか？

こうした疑問に答える手掛かりは何もなく、ただ「期待していたほどではない」という発言だけが繰り返され、あとは国民の一層の努力を求める、という要請が繰り返された。」とのべている。(篠田英朗「西浦モデルの検証⑧ 西浦教授は専門家会議から撤退せよ」アゴラ)

<https://agora-web.jp/archives/2045808.html>

5. 検証作業 (2) : 事後評価

5.1 専門家会議 (6月19日)

緊急事態が解除された後、西浦教授のチームは第1波の実績をもとにした分析を発表している。6月19日に持ち回りで開催された専門家会議で公開された、「新型コロナウイルス感染症の医療提供体制確保のための新たな流行シナリオ」²¹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）「感染症対策における数理モデルの拡大的活用研究」（研究開発代表者：西浦博）の報告であり、3月2日の専門家会議資料²²を更新したものである。この資料では、流行第1波の実績を踏まえて各都道府県で今後必要と想定される入院患者数を推計している。Hayashi et al. (2020)はこの資料の英語版となり、都道府県独自のアラート発出が遅れた場合の入院患者への影響も分析している。

4月22日の専門家会議資料²³にある図5(A)は接触8割削減を目指す根拠として使用された図の1つであり、接触8割削減をした場合と6.5割削減した場合の新規感染者の動きを感染日別と報告日別に示そうとしたものである。この図では、新規感染者数が接触削減前後でつながった動きをしているが、岩本(2023a)で示されたように、この図では変数の取り違えが起こっていて、実際には新規感染者数ではなく感染者数が示されている。本来は、報告日別の新規感染者数は接触が削減された時点で急速に下落する。図5(B)は、Hayashi et al. (2020)にある図の一つであり、感染日別と報告日別の新規感染者の動向を示したものであるが、(A)で使用されたモデルでの（新規感染者ではなく）感染者数の動きのように、アラート前後で新規感染者数がつながっている。

²¹ https://www.kantei.go.jp/jp/singi/novel_coronavirus/senmonkakaigi/sidai_r020619.pdf

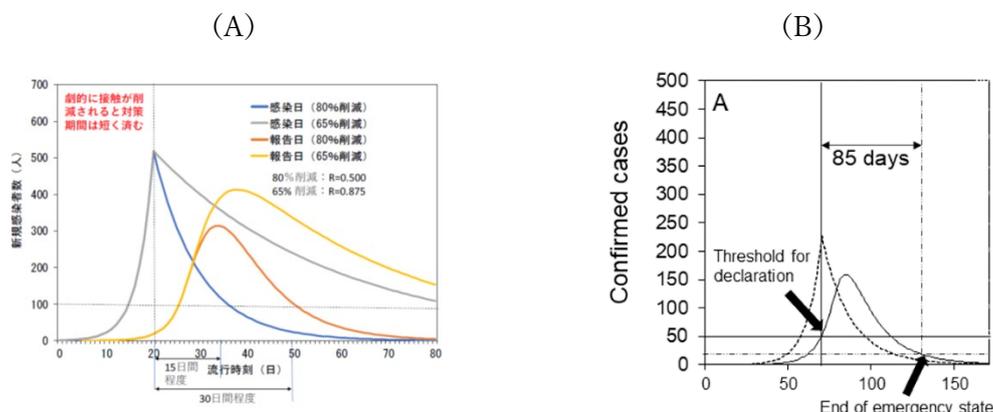
²² 「新型コロナウイルス感染症の流行シナリオ (2月29日時点)」(新型コロナウイルス感染症対策専門家会議、2020年3月2日)

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

²³ 「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>

図5 第1波の事前・事後分析



(注) (A) 縦軸は、新規感染者数ではなく感染者数。(B) 縦軸は100万人当たり新規発症者数。新規発症者の点線は感染日別、点線は報告日別。

(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) Hayashi et al. (2020, Figure 3.A)

ところがここで使用しているモデルは、(A)を描いたモデルとは大きく異なっていて、新規感染者が指数関数的に成長し、アラート発出後は指数関数的に減少するという現象論的 (phenomenological) なモデルである (付録でモデルの詳細を解説する)。また、Jung et al. (2020)は、都道府県独自のアラートに加えて4月7日の緊急事態宣言の前後で新規感染者の成長率が変化する現象論的モデルをデータに適合させている²⁴。いずれも、3月2日資料や4月22日資料で用いられたSIRモデルではない²⁵。

5.2 事後検証の放棄

接触8割削減の提言の事後検証をおこなうとすれば、根拠とされたモデルを用いることが自然である。具体的には、根拠となるモデルに立脚して、事前の見通しと実績を照合することや、実績データを用いてモデルのパラメータを再推定することが考えられる。西浦教授のチームはまったく違うモデルを用いており、このような作業がおこなわれていない。すな

²⁴ そして、第2波の予測もおこなっている。SIRモデルに現れる集団免疫効果が存在しないため、政策介入がなければ新規感染者数は指数関数的に増加を続けることになるが、第2波の予測はこの増加の初期の段階で打ち切られていて、第2波の収束までを予測しようとしたものではない。

²⁵ SIRモデルは、感染と免疫のメカニズムを明示的に定式化した機械論的 (mechanistic) モデルに属する。

わち、モデルの検証を最初から放棄したと言える。

西浦教授のチームの意図は、図5 (A) のような動きをモデルによって導くことのように見える。しかし、当初のモデルを正しく用いて、(A) のようにアラートと緊急事態宣言発出前後で新規感染者がつながった動き（モデルから見て誤った動き）を示すことは不可能である。(A) を訂正して、当初のモデルを正しく用いた結果と実績データを用いて事後検証を行うことも考えられるが、その道はとられていない。そのため、新規感染者数が (A) のような動きを示すためには、別のモデルを用いざるを得ない。その結果、事後分析で使用したモデルでは、1 か月の目標水準に達しなかった現実の動きを近似したという、表面的な説明しかできない。新規感染者数が急速に減少していれば早く目標に達していたであろうことはわかるが、図2あるいは図3のようなロジックモデルをもたないで、当初の1 か月で目標を達成できなかった理由は何か、を検討することはできなくなっている。

6. 結論

本稿では、接触 8 割削減の根拠となった数理モデルの検証に関する課題を検討した。ロジックモデルに基づく、アウトプットである緊急事態宣言が、中間アウトカムの接触頻度を通して最終アウトカムの感染に影響を与える政策効果が考えられていた。日本での接触削減の取り組みは、そもそも接触とは実社会の何を指すのかが示されておらず、政策手段が抽象的になっている。英国では日本よりも具体的で実践しやすい配慮がされ、活動場所に応じて対策の目標値を設定するとともに、遵守率も考慮した対策が提案されていたことは対照的である。

接触頻度が数理モデルに基づいた抽象的な指標であるため観測できないことから、「数理モデルが正しいとすれば」新規感染者が 8 割減少していなければ、接触削減が足りなかったことになる。いわば成果主義の防疫であり、感染 8 割削減という厳しいノルマが与えられるが、何を実行すればよいかかわからず、目標が達成されなければ一般市民の努力が足りなかったと結論づけられることになる。

緊急事態宣言発出後、人流と接触率を用いて接触頻度を観測可能なアウトカムとして、モデルを検証する試みがおこなわれた。しかし、当初の構想に問題がありモデルは検証できなかった。具体的には、人流データに加えて接触率の変化を計測しようとしたが、開発された計測手法が接触率一定を前提としていたため、変化を考慮した計測ができなかった。

接触 8 割削減の提言の事後検証には根拠となったモデルを用いるのが自然だが、西浦教授のチームは異なるモデルを使用しており、当初のモデルの検証は放棄された。接触 8 割削減が提唱されたときにはモデルの変数を取り違えた計算結果が示されていたため、モデルを正しく用いて誤った動きを示すことは不可能である。接触 8 割削減の提唱時の分析結果を訂正して当初のモデルを検証することも考えられるが、その道はとられなかった。このため、当初の結果に沿った動きを示すために、別のモデルが用いられている。

本稿は根拠とされたモデルの現実妥当性を考察したものであり、対策の効果を検証するものではない。検証作業は今後の課題であるが、本稿で指摘された問題の構造を理解して、検証が進められることを望みたい。

参考文献

- アジア・パシフィック・イニシアティブ(2020)『新型コロナ対応民間臨時調査会 調査・検証報告書』ディスカバー・トゥエンティワン
- Begon, M., et al. (2002), "A Clarification of Transmission Terms in Host-microparasite Models: Numbers, Densities and Areas," *Epidemiology & Infection*, Vol. 129, Issue 1, August, pp. 147–153. <https://doi.org/10.1017/S0950268802007148>
- Ferguson, Neil M., et al. (2006). "Strategies for Mitigating an Influenza Pandemic," *Nature*, 442, pp. 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>
- Hayashi, Katsuma, et al. (2020), "Hospital Caseload Demand in the Presence of Interventions during the COVID-19 Pandemic: A Modeling Study" *Journal of Clinical Medicine*, Vol. 9, Issue 10, October, 3065. <https://doi.org/10.3390/jcm9103065>
- 稲葉寿(2020)「基本再生産数 R_0 と閾値原理」稲葉寿編『感染症の数理モデル』東京大学出版会、1–61 頁。
- 岩本康志(2023a)「『接触 8 割削減』の科学的根拠」 CIRJE Discussion Paper CIRJE-J-306. <https://www.cirje.e.u-tokyo.ac.jp/research/dp/2023/2023cj306.pdf>
- 岩本康志(2023b)「『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/2023/2023cj307.pdf>
- Jung, Sung-mok, et al. (2021), "Projecting a Second Wave of COVID-19 in Japan with Variable Interventions in High-risk Settings," *Royal Society Open Science*, Vol. 8, Issue 3, March, 202169. <http://doi.org/10.1098/rsos.202169>
- Linton, Natalie M., et al. (2020), "Incubation Period and Other Epidemiological Characteristics of 2019 Novel Coronavirus Infections with Right Truncation: A Statistical Analysis of Publicly Available Case Data" *Journal of Clinical Medicine*, Vol. 9, Issue 2, February, 538. <https://doi.org/10.3390/jcm9020538>
- 西村康稔(2022)『コロナとの死闘』幻冬舎。
- 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 and 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>
- 尾身茂(2023)『1100 日の葛藤：新型コロナ・パンデミック、専門家たちの記録』日経 BP

Zagheni, Emilio, et al. (2008), "Using Time-use Data to Parameterize Models for the Spread of Close-contact Infectious Diseases." *American Journal of Epidemiology*, Volume 168, Issue 9, November, pp. 1082–1090. <https://doi.org/10.1093/aje/kwn220>

付録 第1波の事後分析

A.1 新規感染者数の成長率の推定

5節で取り上げた6月19日資料、Hayashi et al. (2020)、Jung et al. (2020)は、第1波の実績データから新規感染者数を説明するモデルを推定している。モデルは、都道府を単位とし、3年齢階層（0～19歳、20～59歳、60歳以上）に人口を区分している。新規感染者数の計算は、 t_0 時点から始まり、 t_1 時点で都道府県がアラートを発出する。アラート発出前のある地域のある年齢階層の新規感染者数の成長率は r_1 で、

$$New(t) = New(t_0)e^{r_1(t-t_0)} \quad (9)$$

となり、アラート発出後の成長率は $r_2 (< 0)$ で、

$$New(t) = New(t_1)e^{r_2(t-t_1)} = New(t_0)e^{r_1(t_1-t_0)}e^{r_2(t-t_1)} \quad (10)$$

となる。記号で区別していないが、各地域、各年齢階層で成長率は異なる。

実際に得られるデータは発症日別の流行曲線なので、潜伏期間 τ_0 の後で発症するとすると、 t 時点の発症者数 New^o は

$$New^o(t) = \int_0^\infty g_o(\tau_0)New(t-\tau_0)d\tau_0 \quad (11)$$

と表される（添え字の o は発症 onset を示す）。潜伏期間は個人によって異なり、 g_o はその相対頻度であり、

$$\int_0^\infty g_o(\tau_0)d\tau_0 = 1$$

と表される。

パラメータの推定のために、(11)式を離散時間で表現すると、

$$New_t^o = \sum_{\tau_0=0}^\infty g_{o,\tau_0}New_{t-\tau_0}$$

$$g_{o,\tau_0} = G_{o,\tau_0+1} - G_{o,\tau_0}$$

となる。 G は、潜伏期間の累積分布関数である。新規発症者数が（時間とともに変化する）平均 μ のポアソン分布にしたがうとすると、

$$New_t^o \sim \text{Poisson}(\mu_t)$$

$$\mu_t = New_{t_0} \sum_{\tau_0=0}^\infty g_{o,\tau_0} e^{r_1(t-t_0-\tau_0)} \quad (t < t_1)$$

$$\mu_t = New_{t_0} \sum_{\tau_0=0}^\infty g_{o,\tau_0} e^{r_1(t_1-t_0-\tau_0)} e^{r_2(t-t_1-\tau_0)} \quad (t \geq t_1)$$

が推定するモデルとなる。潜伏期間の分布が得られると、新規感染者の初期値 New_{t_0} と成長率 r_1 、 r_2 が推定できる。潜伏期間は、Linton et al. (2020)の推定結果を用い、平均5.6日、標準偏差3.9日の対数正規分布にしたがうとしている。

6月19日資料、Hayashi et al. (2020)は、生産年齢人口群の代表として大阪府、高齢者人

口中心群の代表として北海道を対象としている。Hayashi et al. (2020)は、 t_0 を大阪府 2020 年 1 月 15 日、北海道 3 月 19 日として、アラートが発出する t_1 を大阪府 3 月 31 日、北海道 4 月 12 日としたと説明している²⁶。また、アラートを 1、3、7 日遅らせたときの流行状況のシミュレーションをおこなっている。本稿の図 5 (B) は、1 日遅らせたシミュレーションである。

A.2 報告日別の流行曲線（感染日別・報告日別）

図 5 (B) は感染日別と報告日別の流行曲線を示している。潜伏期間の分布が得られると、感染日別の新規感染者数は、(11)式を用いて発症日別の新規感染者数から推定することができる。報告日別の新規感染者数は、発症から報告までの報告遅れの分布が得られれば、以下のように推定することができる。

発症者が報告されるまでに要する時間 τ_R の相対頻度を g_R とすると、 t 時点で報告された感染者 New^R は、

$$New^R(t) = \int_0^{\infty} g_R(\tau_R) New^O(t - \tau_R) d\tau_R$$

となる（添え字の R は報告 reported を示す）。報告漏れがないとすれば、報告遅れの時間の分布は、

$$\int_0^{\infty} g_R(\tau_R) d\tau_R = 1$$

となる。報告遅れはクラスター対策班の分析結果である平均 7.9 日、標準偏差 5.5 日の対数正規分布にしたがうとしている。

Jung et al. (2021)は、東京都と大阪府を対象に、1 月 24 日～5 月 26 日の 6,540 の確定例データを用いて流行曲線を推定した。期間は、都道府県のアラート（東京都 3 月 26 日、大阪府 3 月 19 日）と緊急事態宣言発出で三区区分され、

東京都（～3 月 26 日、3 月 26 日～4 月 7 日、4 月 8 日～5 月 25 日）

大阪府（～3 月 18 日、3 月 19 日～4 月 7 日、4 月 8 日～5 月 21 日）

としたとのべている。緊急事態宣言発出時を t_2 とすると、(9)式と(10)式に加えて、

$$New(t) = New(t_1) e^{r_3(t-t_2)}$$

でモデルが構成される。潜伏期間、平均世代期間は Hayashi et al. (2020)と同じ設定である。

A.3 実効再生産数の推定

t 時点の新規感染者は、再生方程式（renewal equation）と呼ばれる、

²⁶ 人口は大阪 8,848,998 人、北海道 5,304,413 人としている。これは、「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）」と一致する。

$$New(t) = \int_0^{\infty} \mathcal{R}(t)g(\tau)New(t - \tau)d\tau \quad (12)$$

で表される。右辺の New （1次感染者）から感染させられた者（2次感染者）が左辺の New となる。 τ は感染齢（感染してからの時間）であり、(12)式では1次感染者と2次感染者の感染時期の差を表すので、世代時間となっている。 g は感染齢ごとの感染性を表し、

$$\int_0^{\infty} g(\tau)d\tau = 1$$

と規格化しており、世代時間の確率密度関数となっている。 \mathcal{R} は瞬時的再生産数（instantaneous production number）と呼ばれる、実効再生産数の一種である。

流行初期で新規感染者が指数関数的に増加しているとすると、

$$New(t - \tau) = New(t)e^{-r\tau} \quad (13)$$

となり、瞬時的再生産数を一定で \mathcal{R}_0 と置き、(12)式に(13)式を代入すると、

$$New(t) = \mathcal{R}_0 \int_0^{\infty} g(\tau)New(t)e^{-r\tau}d\tau \quad (14)$$

となる。ここで、 \mathcal{R}_0 は基本再生産数、 r は内的成長率（intrinsic rate of growth）と呼ばれる。

(14)式の両辺を新規感染者で除すると、オイラー–ロトカ方程式

$$1 = \mathcal{R}_0 \int_0^{\infty} e^{-r\tau}g(\tau)d\tau = \mathcal{R}_0 M(-r) \quad (15)$$

が得られる。 M は、 g のモーメント母関数（ラプラス変換）である。

より一般的な分布として、 g をガンマ分布であると仮定し、 Γ をガンマ関数として、

$$g(\tau) = \frac{k\gamma}{\Gamma(k)}\tau^{k-1}e^{-k\gamma\tau}$$

と置くと、世代期間の平均は γ^{-1} 、分散は γ^{-2}/k 、変動係数の自乗（形状パラメータの逆数）は $1/k$ となり、モーメント母関数は、

$$M(-r) = \left(1 + \frac{\gamma^{-1}}{k}r\right)^{-k} \quad (16)$$

となる。(16)式を(15)式に代入すると、

$$\mathcal{R}_0 = \frac{1}{M(-r)} = \left(1 + \frac{\gamma^{-1}}{k}r\right)^k \quad (17)$$

で表される。平均世代期間は発症間隔に代理させ、Nishiura, Linton and Akhmetzhanov (2020)による平均4.8日、標準偏差2.3日のガンマ分布にしたがうとしている。

現実社会では(12)式での過去の新規感染者の影響は適当な長さで消失すると考えられる。アラート発出後の推定においてアラート発出前の新規感染者の影響が残っている段階では、(17)式は成立しない。その影響がなくなったところから、(17)式が成立すると考えることになる。

表 A1 は、第1波の実効再生産数の推定結果をまとめたものである。アラートと緊急事態

宣言（のみ）が実効再生産数に影響を与えたと仮定して、それらの影響を見ようとしている。

表 A1 第 1 波の実効再生産数

	\mathcal{R}_1	t_1	\mathcal{R}_2	t_2	\mathcal{R}_3
Hayashi et al. (2020)					
大阪	1.54	(3 月 31 日)	0.68		
北海道	1.54	(4 月 12 日)	0.62		
Jun et al. (2020)					
東京	1.78	(3 月 26 日)	0.74	(4 月 7 日)	0.63
大阪	1.58	(3 月 18 日)	1.20	(4 月 7 日)	0.48

（注） \mathcal{R}_1 は $t < t_1$ の実効再生産数、 \mathcal{R}_2 は $t_1 \leq t \leq t_2$ の実効再生産数、 \mathcal{R}_3 は $t > t_2$ の実効再生産数。 t_1 は都道府県アラート発出日、 t_2 は緊急事態宣言発出日。