

GRIPS Discussion Paper 20-04

新型コロナウイルス感染症の広がりに関する一考察

土谷 隆

May 2020



GRIPS

NATIONAL GRADUATE INSTITUTE
FOR POLICY STUDIES

National Graduate Institute for Policy Studies
7-22-1 Roppongi, Minato-ku,
Tokyo, Japan 106-8677

新型コロナウイルス感染症の広がりに関する一考察 (要旨)

政策研究大学院大学
土谷 隆

1. 本研究では、東京都、大阪府、神奈川県の3自治体を取り上げ、簡単な感染症数理モデルをあてはめて種々のデータと整合性のある形で新型コロナウイルス感染症の感染実態を説明することを試みた。項目4から8がモデルによる解析の主たる結果である。
2. 解析に用いるモデルはSIRモデルの単純な一変種で、未感染者・感染者・免疫保持者の割合の時間的変化を記述する。感染者は感染後一定期間(15日間)は他人に感染させる力があり、その後免疫保持者となる。感染者が感染力を持つ期間の感染力は(感染力パラメータ β) \times (その時点での未感染者率)である。自粛や緊急事態宣言等の影響を、 β の日毎の変化としてモデル化した。モデル自身はその考え方も記述も高等学校の数学の範疇で理解できるものである。
3. 解析に用いたデータは下記の通りである。
 - (a) 各自治体によって発表されている日ごとのPCR検査の陽性者数,
 - (b) 厚生労働省 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議より2020年5月1日に発表された、東京都における日ごとの発症数(のグラフ),
 - (c) 東京大学(2020年5月15日プレスリリース)と大阪市立大学(2020年5月1日プレスリリース)から発表された抗体検査の結果.
4. 本感染症の実際の新規感染者数は、各自治体が把握している新規陽性者数の20倍程度はいる可能性があることが判明した。おそらくはこれらの感染者は、罹患中は感染源となるにもかかわらず、本人自身は未発症かごく軽症に終わり、自治体がその実態、感染プロセスを遅滞なく把握することは困難であると考えられる。仮に、発症者よりも感染力が弱いとしても、これらの未把握感染者は人数的には発症者の20倍程度おり、自由に活動し続けるため、感染が拡大していく上で主要な役割を果たしている可能性もある。したがって、ウイルス根絶のためには、行政が把握している新規陽性者が0となっただけでは不十分で、その状態をそれなりの期間継続する必要がある。
5. 東京都において、5月25日に緊急事態宣言の解除が行われた。仮に3週間前後かけて3月26日以前のレベルの社会・経済活動に戻し、そのまま活動を続けると、7月上旬から中旬には感染者が急増する。さらに、仮に、それをそのまま放置すると、10月中旬にピークを迎える大流行となり、12月初旬には収束する。都民の88%が罹患し、36万人が発症し、7万2千人が重症化する。ピーク時には(現在の行政的意味

で) 1万7千人強の陽性者が1日に発生すると予測される。(これは、あくまでモデルによる試算である。実際には、今回すでに行われたような適切な活動制限・自粛を行うことによって回避可能である。西浦による4月15日の全国についての予測とオーダー的には合致している。)

6. 直近の戦略について述べると、6月30日まで緊急事態宣言解除を延期して、その後比較的早く3月下旬のレベルまで社会活動を戻す方が、現行の解除戦略よりも、第2波が起こるまでにより長期間の活動が可能となるだけでなく、クラスター対策がより有効なレベルまでウイルス感染者が減少しうる点で、活動制限延長の損失を補って社会的には利得が大きいと考える。現行の戦略は、ウイルスが減少しきっていないうちに社会・経済活動を戻すため、最悪の場合には6月中に感染者が再増加し、再び活動制限や自粛をしなくてはいけなくなる可能性がある。
7. 現行のシステムにおいても、ウイルス感染拡大を抑えるという立場だけからだけであれば、社会・経済活動を2ヶ月の活動期間と3ヶ月の活動制限期間を繰り返す形で、最大1日100人程度の(行政的意味での)陽性者発生に抑え、周期的に持続していくことは可能であると思われる。(過去4ヶ月の内2月、3月を活動期間、4月、5月を活動制限期間として、仮にさらにもう一月、ウイルス感染鎮静化のため、6月までを活動制限期間としてみれば良い。) ただし、これでは経済的に持続可能とは限らないので、いろいろな工夫をして、3ヶ月の活動期間と1-2ヶ月の活動制限期間を繰り返す形にできるようにすることが、まずは、一つの現実的社会的目標として考えられる。
8. 大規模な抗体検査、PCR検査、ICTの活用等、ウイルスの感染実態をつかむ継続的なサーベイランスによる予測精度向上と社会全体での情報共有が重要である。
9. なお、筆者は統計数理や数理工学の研究者ではあるが、感染症の数理モデルの専門家ではない。流行の態様と行く末を定量的に理解することを目的として、公開されているデータと素朴な数理モデルのみを利用して何ができるか、非力ながらも自分なりに真剣に考えてまとめたものが本小論である。モデルの帰結として若干の予測なども行っているが、これを読まれる方は、書かれている予測結果を鵜呑みにすることはせず、自身の責任で、検討材料の一つとしていただければ幸いである。モデルの検証に必要なことはすべて小論内に書かれている。なお、本小論の結果や考察はあくまで筆者個人の意見として発信されるものであり、筆者の所属大学の公式見解とは無関係である。

新型コロナウイルス感染症の広がりに関する 一考察

政策研究大学院大学

土谷 隆*

2020年5月28日

1 はじめに

現在大流行が起こり世界的に蔓延している新型コロナウイルス感染症への対策は喫緊の課題である。本小論では、東京都、大阪府、神奈川県 の 3 自治体を取り上げ、簡単な感染症数理モデルをあてはめて種々のデータと整合性のある形で感染の実態を説明することを試みる。

解析に用いるモデルは感染症の基本モデルとされる SIR モデル [1] の単純な一変種で、未感染者・感染者・免疫保持者の割合の時間的変化を記述する。感染者は感染後一定期間は他人に感染させる力があり、その後免疫保持者となる、という簡単なものである。感染者が感染力を持つ期間の感染力は (感染力パラメータ β) \times (その時点での未感染者率) である。自粛や緊急事態宣言等の影響を、 β の日毎の変化としてモデル化する。推定やシミュレーションは R を用いて行った。

データとしては、(a) 各自治体発表されている日ごとの PCR 検査の陽性者数、(b) 厚生労働省 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議より発表された、東京都における日ごとの発症数 [2]、(c) 東京大学と大阪市立大学から発表された抗体検査の結果 [3, 4] を用いた。これらはすべて公開されているものである。

本小論では、上述の 3 自治体について、できるだけ既存データを整合性があるようにモデルのパラメータを合わせて解析を行った。その結果、実際の新規感染者数は、各自治体が把握している新規陽性者数の 20 倍程度はいることが示唆された。おそらくはこれらの感染者は、罹患中は感染源となるにもかかわらず、本人自身は未発症かごく軽症に終わり、自治体はその実態、感染プロセスを把握することは困難であると考えられる。仮に、発症者よりも感染力が弱いとしても、これらの未把握感染者は人数的には発症者の 20 倍程度おり、自由に活動し続けるため、感染が拡大していく上で主要な役割を果たしている可能性もある。この事実を念頭において感染対策を立てることは必須であると考えられる。

*〒 106-8677 港区六本木 7-22-1; e-mail: tsuchiya@grips.ac.jp

大阪では、5月21日に、東京と神奈川では5月25日で緊急事態宣言は解除された。本小論では、推定されたモデルを用いて、東京について、将来のシミュレーションを行った。その結果、急激に緩和を行った場合には、7月に第2波が来て中旬には感染拡大を防ぐための行動制限を行う必要があり、ゆっくりと緩和を行った場合でも、8月下旬には第2波が来て行動制限を行う必要がありうることが示される。

筆者は政策的選択肢としては6月30日まで解除を延期することもあり得たと考える。解除時期を延期することは、第2波が来るまでに自由・活発に活動時間できる時間をより長く取れるだけではなく、6月下旬までに、クラスター対策が威力を発揮するというレベルまでウイルス感染者数が減少するという利点があることも議論される。この点は、今後、流行終息後の社会・経済活動再開を考える上で十分に検討に値する論点であろう。

過去4ヶ月を振り返ると、現行のシステムにおいても、社会・経済活動を2ヶ月の活動期間と3ヶ月の活動制限期間を繰り返す形で周期的に持続していくことは可能であると思われる。いろいろな工夫をして、3ヶ月の活動期間と2ヶ月の活動制限期間を繰り返す形にできるようにすることを、一つの現実的社会的目標とするのがよいのではないかと考える。このような一定の予測が与えられることは、社会を円滑に動かして行く上で大きな力となるのではないだろうか。

なお、筆者は統計数理や数理工学の研究者ではあるが、感染症の数理モデルの専門家ではない。しかしながら、本感染症を理解することは、社会的にも個人的にも重要な課題であると考えている。「第2波」という言葉に象徴される本感染症の流行の行く末について、ほとんど定量的な議論がされていない現状についてはいささか不安と戸惑いを覚えるというのが正直なところである。

そこで、流行の態様と行く末を定量的に理解することを目的として、公開されているデータと素朴な数理モデルのみを利用して何ができるか、非力ながらも自分なりに真剣に考えてまとめたものが本小論である。モデルについても完全に本論内で完結する形で記述しており、また、それは高校数学の範疇で十分に理解できるものであると思う。この小論が社会でこの問題の解決にさまざまな立場から取り組んでいる皆様に少しでも役立つようなことがあれば幸いである。モデルの帰結として若干の予測なども行っているが、ここに書かれている予測結果を鵜呑みにすることはせず、くれぐれもモデルとその限界も考慮の上で検討の材料としていただければと願っている。

なお、本小論の結果や考察はあくまで筆者個人の意見として発信されるものであり、筆者の所属大学の公式見解とは無関係であることを申し添えておく。

2 モデル

考えている国や自治体の中での t 日における未感染者の比率を $S(t)$ 、患者の比率を $I(t)$ 、治った人(+亡くなった人)の比率を $R(t)$ とする。常に $S(t) + I(t) + R(t)$ は一定である。以下の仮定を置く。

(仮定)

1. 未感染者が十分に多い時に、時点 t において一感染者の持つ感染力を $\beta(t)$ とする。この意味は、10 人感染者がいた時に、次の日に新たな感染者は $10\beta(t)$ 人発生する、という意味である。
2. 実際には、集団の人数を N とすると、新たな感染者数を $\beta(t)I(t)S(t)N$ で与えられるとする。したがって、比率にして、新規感染者は、 $\beta(t)I(t)S(t)$ だけ増える。(感染力は未発症者の比率 $S(t)$ に比例する。)
3. 感染者は、感染した日から D 日経つと治って感染力を失う。

の仮定の下で、感染の推移は以下の 3 つの漸化式で書ける。

$$\begin{aligned} I(t+1) &= I(t) + \beta(t)I(t)S(t) - \beta(t-D)I(t-D)S(t-D), \\ S(t+1) &= S(t) - \beta(t)I(t)S(t) \\ R(t+1) &= R(t) + \beta(t-D)I(t-D)S(t-D). \end{aligned}$$

これらの式より、 $S(t) + I(t) + R(t)$ が一定であることは容易に確認できる。

仮定 2 は「集団における未感染者の割合が高ければ、未だ感染者が少ないために感染速度は抑制され、未感染者の割合が小さければ、すでに感染者が病気を移す対象である未感染者が少なくなってしまうため、やはり感染速度は遅くなる」ことを表しており、標準的なものである。また、一度治ったものはもう一度はかからない（再感染がない）ことを仮定するが、これは、少なくとも一流行期間というレベルの短い期間では近似的には成立していると考えられる。また、本小論で検討するような状況では $R(t)$ の比率は相当に小さく、一度治った者が再度感染するかどうかは議論の行方に大きくは影響しない。

さらに、次の仮定を置く：

(仮定 (続))

4. コロナウイルスに感染して最終的に抗体を有するようになる者の中で、自治体に感染者として把握される者の比率は一定である。この比率を $1/C$ と置く。 C は一人の行政的感染者の背後に把握困難な軽症あるいは未発症の感染者が何人いるかを表す。
5. 感染者が自治体に把握される感染者となる場合、感染してから発病するまでに W_1 日、さらに、経過観察などの時間を含めて加えて W_2 日、感染してから合計 12 日かかるものとする。すなわち $W_1 + W_2 = 12$ とおく。この 12 という日数は決め打ちであるが、感染から発症まで数日あり、4 日間発熱症状が続いてから、保健所等に相談、その後 PCR 検査を受けて、陽性と出れば認定される、というプロセスを経ることを考えると、12 日は第 0 近似としては、妥当な日数と考える。

仮定 4 は、コロナウイルス感染症の病態が、感染者の多くが未発症あるいはごく軽症のまま行政体に把握されることなく完治しその間に人に感染させる、というものであるらしい、ということを反映している。以下、自治体に把握される感染者を行政的感染者と呼ぶことにす

る。時点 t での行政的感染者数を $P(t)$ と記す。ある時点 t での新規感染者は、未感染者の減少数 $N(S(t-1) - S(t))$ で与えられる。そして、これらの感染者の内 $1/C$ が行政に把握される。把握されるのは、感染してから 12 日後であるとしている。したがって、

$$P(t+12) = \frac{1}{C}(N(S(t-1) - S(t)))$$

が成立する。

時点 t での発症者数を $H(t)$ と書くことにしよう。行政的感染者の多くは自覚症状があって PCR 検査を受けて陽性者と判定されており、発症・発熱などの症状があるが、行政的感染者でも濃厚接触者の中には未発症の者もいる。ここでは、行政的感染者の中での発症者の比率を r_0 と置く。すると、時点 t での新たな感染者のうち、行政的感染者として把握される者の数は $N((S(t-1) - S(t))/C)$ で、その中で r_0 の割合のものが $t + W_1$ の時点での発症者となるので、

$$H(t + W_1) = r_0 \frac{N(S(t-1) - S(t))}{C}$$

が成立する。行政的感染者という概念は検査システム等に依存するので曖昧ではあるが、現状では、東京の場合、概ね行政的感染者の 6-7 割が実際に発症するので [2]、本小論では、行政的感染者はある程度発症者レベルでの感染状況はそれなりに反映していると思ふ。

また、時点 t における抗体検査の陽性比率は時点 t で治っているものの比率 $R(t)$ と、それに感染中のものの比率 $I(t)$ を加えた $I(t) + R(t) = 1 - S(t)$ の間にあると考えられる。

なお、SIR モデルとの比較で言うと、このモデルは、SIR モデルにおいて、標準的記法において γ とされる量を、

$$\gamma(t) = \frac{\beta(t-D)I(t-D)S(t-D)}{I(t)}$$

と選んだものとして考えられる。SIR モデルは、新規感染者が治るまでの時間の分布が指数分布であるが、このモデルは、代わりに、新規感染者が治るのは必ず感染してから D 日後であり、その間は感染させる力を持つ、としたものである。

感染拡大についてよく言われる目安である「実効再生産数」 R_t は、一人の感染者が感染中に他の感染者に移す人数の期待値である。本モデルの場合には、一度感染した者は D 日感染者でいて、その間は他人に感染させるという単純化した想定を取っているので、

$$R_t = \beta(t)S(t)D$$

である。(この R_t はモデル中の記法に出てくる $R(t)$ とは別物である。) SIR モデルであれば、 $R_t = \beta(t)S(t)/\gamma(t)$ とかけるが、これは、感染者が感染力を持つ時間の期待値が $1/\gamma(t)$ で与えられるためである。本モデルの場合、モデルの定義から、感染者が感染力を持つ時間の期待値は D となる。より精密には、 $R_t = \sum_{i=1}^D \beta(t+i)S(t+i)$ とするべきかもしれないが、時点 t の量で近似的に書くと上のようになる。実効再生産数が 1 未満になったからといって直ちに感染が終息するわけではなく、1 未満の状態を長期間続けないと感染は終息しないことに注意する必要がある。

なお、このモデルは SIR モデルの自然な変型版なので、おそらくは感染症の分野ではよく知られているモデルの一つではないか、と思われる。また、本稿で以下試みていることは、現象を記述するための差分方程式（微分方程式）のパラメータをデータから適切に定めるという点で、小規模ではあるが「データ同化」の一例とも看做することができるかもしれない。

3 データ

次のデータが利用できる。

1. 各自治体のHP等から利用できる日毎の陽性者数
2. 東京における日毎の発症者数 [2].
3. 東京 (4 件), 大阪 (1 件), 神戸 (1 件) の抗体検査の結果。また、東京で別途コロナウイルス感染症以外の PCR 検査による陽性率のデータが 1 件ある。

これらのデータと整合性があるようにパラメータを決定してモデルを推定することが目的となる。

特に、東京における日毎の発症者数のデータ [2] は、感染のピークが 3 月下旬で緊急事態宣言が出される一週間以上前であることを示唆する衝撃的なものである。

東京においては、抗体検査は東京大学、厚生労働省、千駄ヶ谷インターナショナルクリニック、東京：ナビタスクリニックの 4 件があった。今回は、東京については、医療機関利用者からの無作為抽出で、抗体キットではなく機械でより精密に抗体価を測定できていると思われる東京大学の結果に依拠することとした [3]。大阪においては、やはり、附属病院来院者からの無作為抽出を行っている、大阪市立大学の抗体検査の結果を用いる [4]。神戸からは神戸市立医療センター中央市民病院の抗体検査の結果が報告されている [5] が、調査期間の 3 月 31 日から 7 日の直後、院内感染が発生しており、4 月 9 日から 5 月 12 日にかけて患者・職員 (+ 関係者 1 名) で 29 名の陽性者が出ている。これは、神戸市の陽性者の 10% 以上にあたり、残念ながらこの抗体検査の結果をそのまま神戸市全体のデータを解析するのに用いることには躊躇を覚え、よって今回は割愛することとした。

このような吟味の末、抗体検査や PCR 検査については、最終的には、本研究では東京 1 件 (東京大学)、大阪 1 件 (大阪市立大学) の抗体検査を用いてモデルを推定した。より詳しくは、5.2 節参照。

4 モデルで推定されるパラメータ

モデルの含むパラメータは下記の通りとなる。以下、 t の単位は日とし、 $t = 1$ を 2020 年 1 月 1 日とする。

1. D : 感染した者が感染力を持つ日数。感染より D 日めで感染者からは外れる。感染の態様を決める上で重要なパラメータで、 D が長いと対処が困難となる。今回は、 $D = 15$ とした。

これは、事実上、発症者というよりは、大多数を占める未発症感染者に関する仮定であることに注意しよう。(通常、発症者が感染してから回復に至るには、15日より長い期間を要するようである。) そのように考えると $D = 15$ は長めかもしれないが、 D は長いほど感染力が強いということになるので、このケースについて解析を行えば、それが一定の判断規範となり得ると考える。

2. D 日目 (1月15日) における感染者の比率 $I(D)$. $I(1)$ から $I(D)$ はゼロとする。
3. 感染者に対する行政的感染者の比率 $1/C$.
4. 感染者が感染してから仮に発症した場合に発症までに要した日数 W_1 , そしてそれから行政体が把握するのに要した日数 W_2 . ここでは、先にも述べたように、 $W_1 + W_2 = 12$ を仮定する。
5. 各時点での $\beta(t)$ ($t = 1, 2, \dots, \dots$) これを想定することで、感染力の変化がモデル化できる。本論では「(i) 3月下旬までは、自粛ムードはあったものの比較的緩やかであった。(ii) 3月下旬から感染者が増大しはじめ、社会的に自粛や社会的距離の強化が顕著となった。(iii) 4月に入り、社会的緊張も高まり、4月7日に緊急事態宣言が発令された」というプロセスを辿ったことに鑑みて、以下のように β の変化をモデル化した。
 - (a) $\beta(D) = \beta_0$ とし、3月下旬から4月下旬に相当する T_1 日目までは、 $\beta(t) = \beta_0$ とする。 β_0 は推定すべきパラメータ。(フェーズ0)
 - (b) T_1 日目以降は、自粛を想定して、 $\beta(t+1) = \beta(t)r_1$ とした。 β は等比級数的に減少。 r_1 はパラメータ。(フェーズ1)
 - (c) T_2 日目以降は、緊急事態宣言の影響があることを考慮して、 $\beta(t+1) = \beta(t)r_2$ とした。 r_2 はパラメータ、 β は等比級数的に減少。(フェーズ2)
 - (d) T_3 日目以降は、社会的に一定のレベルまで下がり、一定値となることを想定する。(フェーズ3)

$t = 60$ が2月29日、 $t = 91$ が3月31日に相当することを注意しておく。各社会的インパクトがスタートした日程については、 $T_1 = 87$ (3月27日)、 $T_2 = 98$ (4月7日) とした。 T_3 については、 $T_3 = 121$ (4月30日)、 $T_3 = 128$ (5月7日) の2つを候補として検討した。前者 $T_3 = 121$ の方がより緩い自粛となる。

今回事前知識でほぼ決め打ちしたパラメータは、 D, T_1, T_2, T_3 , および $W_1 + W_2$ (= 感染者が行政に把握され登録されるまでの期間), そしてデータから推定したパラメータとしては、 $I(D), \beta_0, r_0, r_1, r_2, C, W_1, W_2$ となる。

5 推定結果と考察

5.1 推定手順と結果

東京に関しては、(a) 日ごとの行政的感染者発生数、(b) 厚生労働省専門家委員会の5月1日の報告書 [2] による日ごとの発症者数 (c) 東大による抗体検査結果 (500人中抗体陽性者3

人, 0.6%) [3] に依拠し, これらのデータと整合性をとれるようにパラメータを推定した. その結果, $C = 23$, 発症までの日数 W_1 は3日であると推定されたので, W_1 は大阪と神奈川の推定にも用いた. W_1 は典型的には5といわれることも多く, それに比べると少々短い. しかし, このモデルはいろいろなところで大胆な近似をしており, モデルにデータを当てはめた上での演繹的性格を持つ推定値であることを考えると, 合致のレベルとしては十分に許容範囲であると考えられる.

大阪については, (a) 日ごとの行政的感染者発生数, (b) 大阪市大による抗体検査結果 (312人中抗体陽性者3人, 1%)[4]に基づいて, 2つの推定結果を用意した. まず, 一つ目の結果は, (a), (b) と整合性があるように推定したもので, その結果として, C が65となり, 東京のものとは異なってくる. 一方, C はその性質からいってあまり場所では変化がない, と考えるのも自然な立場である. そこで, 東京と同じく $C = 23$ として, (a) を合わせるように推定を行った. その結果, 抗体検査の結果 (b) については, 多少ずれが生じることとなる. しかし, 後ほど議論するように, そのずれは一定統計的には許容できるものであるので, 東京の結果との整合性を考慮すると, 現時点では, 大阪2の方がより妥当なものであると考えられる.

抗体検査の結果のない神奈川については, C の値を東京と同じく23として, 日ごとの行政的感染者発生数を合わせるように, 推定を行った.

表 1: 推定されたパラメータ

行政単位	β_0	$I(D)$	r_1	r_2	C	1月15日時点での推定感染者数
東京	0.16	1.6×10^{-7}	0.91	0.97	23	2.24
大阪1	0.16	2.5×10^{-7}	0.91	0.97	65	2.2
大阪2	0.16	9×10^{-8}	0.91	0.96	23	0.79
神奈川	0.16	0.6×10^{-7}	0.91	0.97	23	0.54

推定されたパラメータを表1に示す. 東京の感染者発生数推定結果を図1(a), 図2, 大阪2の結果を図3(a), 神奈川の結果を図4(a)に示す. 図1,3,4には β の値の変化(各図(b)), 実行再生産数の変化の時系列(各図(c))も掲載されている. 推定時点は5月中旬なので, 5月中旬以降の行政的感染者発生数については, T_3 を5月7日として補外・予測したものとなる. これは, GW後に自粛の強化が終わり, あとは, β の値が固定されるというモデルである. T_3 をGW前に固定するモデルも検討したがあまり差はない. 図5(a)-(c)は, 東京, 大阪, 神奈川の未感染者, 感染者, 免疫保持者の推移を描いたものである.

注目すべきは, 以下の点である.

1. モデルの整合性より C を求めることができる. 東京の抗体検査の結果より推定された C の値は23であった. これは行政が把握している感染者(有症状者が多い)一人について, およそ20人程度のごく軽く感染して治ってしまう感染者がいる, というこ

る。大阪については抗体検査の結果と合わせると C は 65 であったが、次節で検討するように、東京と同じ $C = 23$ とした推定も十分に統計的には許容されうる。

2. 初期段階での基本的な感染力のパラメータである β_0 は大体 0.16 程度であった。これは、実効再生産数としては $2.4 (= 0.16 \times 15)$ 程度である。
3. 東京の発症者数のデータは、推定を行う上で重要な情報となる。本モデルでは、感染者は(発症する場合)感染後 W_1 日目に発症し、それから W_2 日後に行政が把握する。発症者は概ねほぼ一定の時間遅れで行政的感染者発生数に反映すると考えられる。一方、行政的感染者数はそれ自身未発症感染者も含んでいる。そこで、本モデルでは、 t 日の発症者数は、 $t + W_2$ 日の行政的感染者数に定数 r_0 をかけたものとして推定した。 $W_1 + W_2 = 12$ と決めうちしているので、 W_2 を決めることは、感染から発症までの日数 W_1 を決めることと同じである。

これらの事情を考慮した結果、感染から発症までは $W_1 = 3$ 日、そして、発症者は行政的感染者(陽性者)の $r_0 = 0.67$ 倍とすることが、一番データをよく説明できることが判明した。結果を図 2 に示した。この発症者データは、パラメータ r_1, r_2 を定める上で重要な役割を果たしている。

4. 大阪、神奈川の r_1, r_2 の値については、東京での発症者の発生傾向に合うように調整した。3 自治体どのケースにおいても、特に、緊急事態宣言以前の減少係数 r_1 が小さく、緊急事態宣言後の r_2 が大きいことは、意外に感じられるが、緊急事態宣言がなければ、4 月に持続的に β を下げていくことは困難であったと考えられる。図 1 は「3 月の下旬には、すでに感染者が急激に増加しつつあり、これを、急激に減少させるように社会的な行動の変化が起きて感染爆発を防ぎ、緊急事態宣言が出されたのはその動きが一段落したところである」という衝撃的な事実を示している。ある意味で、今回はたまたまうまく感染爆発直前で回避できたものの、このような 12 日の現状把握の遅れがちぐはぐな行政的対応を招いたといえなくもない。大きな反省課題となりうると考える。
5. 表 1 の一番右の列に、1 月 15 日の時点での推定感染者数を載せた。これは、 $I(D) = I(15)$ の値に、各自治体の人口を掛けて得られるものであるが、東京で 2 人強、大阪と神奈川で 1 人弱である。これは、1 月中旬の日本での状況を考えると、あまり違和感なく受け止められる数字であろう。実は、 $I(D)$ と β_0 の推定に当たっては、3 月下旬の行政的感染者発生カーブの立ち上がりをうまく合わせることに注力しており、最初期の 1 月 15 日の感染者数が結果的にどのように推定されるか、についてはまったく注意を払っていなかった。にもかかわらず、まあまあ妥当な数値が出てきている、というのは興味深い。ある意味、モデルの妥当性を主張する上で一つの補強材料ではないかと考える。

5.2 病院等の抗体検査や PCR 検査との整合性

抗体検査の結果が東京で 4 件、大阪で 1 件、神戸で 1 件、PCR 検査の結果が東京で 1 件報告されている。既に上で書いた事情より、東京については、東大の検査結果を、大阪は大阪市

立大学の結果を元に解析した，既述の理由により，今回は神戸のもの利用は見送った．推定にあたっては，これらの抗体検査の結果との整合性も考慮した．ここでは推定結果についてより詳しく検討する．

抗体が出る可能性があるのは，感染者 $I(t)$ と免疫保持者 $R(t)$ ．感染者 $I(t)$ の中ではまだ抗体が作られていない可能性もある．そこで， $I(t) + R(t)$, $I(t)$, $R(t)$ 3つの数値を示す．

1. 東京

- 千駄ヶ谷インターナショナルクリニック：4月3日-28日（この期間については病院HPの情報より），91人中8人陽性（8.8%）（<https://www.fnn.jp/articles/-/38276>）.
- 東京：ナビタスクリニック：4月，一般市民147名中7名，医療従事者55人中5名が陽性（<https://www.tokyo-np.co.jp/s/article/2020043090070748.html>，<https://www.fnn.jp/articles/-/38276>）．
（全体として212名中12名，5.9%が陽性.[6]）
- 東京：東京大学等：5月1日，2日に都内の一般医療機関で採取され臨床検査企業で委託測定に使われた残余である500件の（匿名）検体：500件中3件が陽性 [3].
- 東京：厚生労働省：抗体検査キット性能検査のため．東京500件中1-3件（検査キット）（<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000630744.pdf>，<https://www.chemicaldaily.co.jp/>）
- 慶応病院：（発熱外来・救急外来を除いた）入院前PCR検査の陽性件数（4月6日-12日：0/97（0%）；4月13日-19日：5/67（7.46%）；4月20日-26日 2/60（3.33%）；4月27日-30日 0/34（0%））
（<http://www.hosp.keio.ac.jp/oshirase/important/detail/40185/>）

上記の内，一番無作為抽出に近いと思われる東大のものだけを用いてモデルの推定を行っている．モデルによる感染者の推定比率を表2に示す（現在感染している人の比率が I ，治った人の比率が R ，抗体検査の結果は概ね $I+R$ を見ている．PCRは I のみを見ている．）

表 2: 東京の推定結果

	4/1	4/10	4/20	4/25	4/30
I+R	0.39%	0.61%	0.75%	0.78%	0.80%
R	0.07%	0.21%	0.50%	0.61%	0.69%
I	0.31%	0.4%	0.25%	0.17%	0.11%

推定結果は，東京大学の抗体検査陽性率0.6%と概ね符合している．残念ながら，慶応大学のPCR検査の陽性率は，抗体検査の結果に合わせたモデルの結果から大きく外れている．理由は不明である．ただし，4月中旬のみに陽性者が検出されているのは，4

月初旬から中旬に流行し、下旬には流行が収まりつつあるという状況を反映しているとみるのが自然であろう。

2. 大阪：大阪市立大学附属病院で、4月下旬の2日間について、COVID-19以外の目的で外来受診した患者の残余血清を312名無作為抽出して検査し、3名の抗体陽性者が検出されたことが5月1日に発表された(陽性率 0.9615%)

([4], NHK ニュース <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20200501/k10012414101000.html>)

抗体検査の結果と行政的感染者数の推移を合わせ推定を行ったところ、 $C = 65$ となった。結果は表3の通り。モデルによる抗体検査の陽性率は、0.9から1.2%と概ね合致している。

表 3: 大阪の推定結果 1

	4/1	4/10	4/20	4/25	4/30
I+R	0.6%	0.9%	1.2%	1.2%	1.2%
R	0.1%	0.3%	0.8%	0.9%	1.0%
I	0.5%	0.6%	0.4%	0.3%	0.2%

東京の解析で推定された $C = 23$ という結果を用いて推定してみることも試みた。結果は表4の通り。陽性率は0.4%と抗体検査の結果よりは低めに出ているが、実は、この結果が抗体検査の結果とそれなりに合致していると見ることも可能である。実際、0.4%が実際の陽性率であるとして、312個サンプルして3個陽性が出る確率は0.093であり陽性率0.4%を帰無仮説とすると検定では棄却できない。(ちなみに、0個、1個、2個、4個の確率は、それぞれ0.286, 0.359, 0.224, 0.028である。) プレスリリースにもあるように、大阪市立大学での抗体検査は独自の抗体検査法の開発・臨床試験の一環として行われたようので、さらなる精査が必要となりそうである。図4は大阪の推定結果2のパラメータに基づくグラフである。

表 4: 大阪の推定結果 2

	4/1	4/10	4/20	4/25	4/30
I+R	0.22%	0.34%	0.41%	0.43%	0.44%
R	0.04%	0.12%	0.28%	0.34%	0.39%
I	0.18%	0.22%	0.13%	0.09%	0.05%

最後に、神奈川についての推定結果を表5に示す。東京や大阪よりは少し低めの値が出ている。

表 5: 神奈川の推定結果

	4/1	4/10	4/20	4/25	4/30
I+R	0.15%	0.23%	0.28%	0.29%	0.30%
R	0.03%	0.08%	0.19%	0.23%	0.26%
I	0.12%	0.15%	0.09%	0.06%	0.04%

5.3 実効再生産数の推定

東京の場合2月中旬より3月下旬にかけて2.4で推移し、3月下旬より急激に減少、1未満となったのは、4月5日のことであった。2020年5月17日現在で、0.32である。実は、このモデルでは時刻 t では、 $\beta(t) \times 15 \times S(t)$ が実効再生産数である。ただし、 $S(t)$ はほとんど1なので、概ね $\beta(t) \times 15$ で見積もることができる。自粛疲れということもあるので、ここでは $\beta(t)$ はGW明けの5月7日まで減少し、その後一定であることを想定する。その場合には、実効再生産数は0.32である。大阪、神奈川も同様である。図1(c),3(c),4(c)は実効再生産数の推定時系列である。

6 シミュレーション

本節では、シミュレーションにより、東京都における緊急事態宣言の解除時期について検討する。社会・経済活動のレベルを変えることは（結果的に） $\beta(t)$ を変えることに他ならない。本小論では、1月始めから3月26日までは $\beta(t) = \beta_0 = 0.16$ と置いている。そこで、 $\beta(t) = \beta_0 = 0.16$ となることを以って、自粛や行動制限が本格的に始まる前の状態に戻す、ということの意味することとし、それを3月26日以前の活動レベルに戻す、ということにする。3月26日直前の三連休(3月20,21,22日)あたりから自粛による行動変容が顕著になりつつあったとも考えられるが、1月からの総体的な活動レベルに対応しているのが $\beta = 0.16$ である、と見なす。最低限、この程度の活動レベルに戻さないと、飲食業者、ホテル、音楽、演劇、芸能等の活動事業者の大多数が引き続き社会・経済活動は行っていくことが困難であると筆者は考える。結果としては6月下旬まで解除を待ち、一旦解除したら、早めに3月26日以前の活動レベルに社会・経済活動に戻した方が良いことが示唆される。シミュレーションはすべてGW明けで $\beta(t)$ を固定するモデルで行った。

6.1 何もしない場合

まず、緊急事態宣言を5月25日に解除して、そのまま3週間後、6月15日には、活動レベルを3月26日以前の状態まで戻し、仮想的にはあるが、形式的に、同レベルの社会的活動を続けるとどうなるかを図6に示す。本節の他のシミュレーションと同様、あくまでも、2節で説明した単純なモデルと推定したパラメータによる試算である。

7月中旬から巨大な流行が始まり、9月中旬から10月下旬にピークを迎え、1日17000人程度の行政的感染者が発生し、集団免疫がついてその後自然と急速に減少、10月下旬には収まる。都民の88%が罹患し、行政的感染者は累計54万人、発症者は36万人程度となる。その内7万2千人程度が重症化する。東京での死亡率を5%(~(5月25日現在で亡くなった方の数の累計)/(5月25日現在の行政的感染者累計))とすると、2万7千人の方が亡くなるという結果となる。東京都についての試算であるが、これは、西浦による全国に関する予測(死亡者42万人)[7]とオーダーのレベルでは概ね整合するものである。

ただし、実際には、このような状況を社会が放置するとは考えられず、何らかの処置はとられる筈であり、また、国民の行動も状況に応じて変容するので、この通りになるということは想像しにくい。一方、今年の3月末の状況は、この感染爆発の上り口に立ったものであると筆者は考えるし、それを、何とか各自が各々の立場での努力を積み重ねて感染爆発を回避したということである、と解釈している。実際、山の大きさは異なるものの、図6(a)の左の小さい山と大きい山の立ち上がりの様子は相似形である。

一歩対応が遅れると、被害者が急増するこの感染症の恐ろしさを常に念頭において対応を考えないといけない。一見、自粛や行動制限を遅らせることで、通常のレベルで社会・経済活動ができる時間が長くとれるように思われるが、結局、遅らせるぶんだけ患者が増え、回復にさらに時間がかかるので、社会トータルで考えると、自粛要請や行動制限を遅らせることのマイナスが大きいと筆者は考える。

なお、本小節での試算は再感染がないという仮定の下で行っていることを最後に注意しておく。ここでの試算のような大きな流行の解析の場合、再感染があるかどうかは結果に（おそらくは悪くなる方に）影響するが、次小節以下で行うような集団のなかで罹患する者がかなり少ない、 $R(t)$ が小さい状況での解析では、再感染の有無は結果に大きくは影響しない。

6.2 コントロールを行う場合

感染爆発の悪夢を避けるために、第2波の流行が、行政的感染者が1日最大100人程度となるように自粛等を行ってコントロールすることとし、それまでにどの位の期間活動できるかを検討する。

1. 緊急事態宣言解除時期については、現行の5月25日で解除、6月30日で解除、の2パターンを考える。
2. 解除後の社会的行動の緩和の仕方については、3週間で3月26日の活動レベルまで戻す急速な緩和、6週間かけて3月26日の活動レベルに戻す緩やかな緩和の2つのパターンを考える。

これらを組合せて合計4つのパターンを検討した。一旦3月26日の活動レベルまで戻したら、第2波の感染拡大が無視できなくなるまでは、この活動レベルを保つ。第2波については、1日の発生行政的感染者が100人をピークとして急速にゼロになるようにコントロールをする。発生患者が50人を超えたら、急速な行動制限に入る、というイメージである（その位でピークが100人位となる）。

(Case A) 5月25日に緊急事態宣言を解除して、急速に β を大きくしていき、3週間後、6月15日には β 値を3月26日直前の状態まで戻し、流行第2波が来るまで活動し、その後(今回に準じた)急速な行動制限に入る、という社会的コントロールを行った場合の行政的感染者数変化。(図7)

(Case B) 5月25日に緊急事態宣言を解除した上で、緩やかに β を大きくしていき、最終的には6週間後、7月6日には β 値を3月26日直前の状態まで戻し、流行第2波が来るまで活動し、その後(今回に準じた)急速な行動制限に入る、という社会的コントロールを行った場合の行政的感染者数変化。(図8)

(Case C) 6月30日に緊急事態宣言を解除して、急速に β を大きくしていき、3週間後、7月21日には β 値を3月26日直前の状態まで戻し、流行第2波が来るまで活動し、その後(今回に準じた)急速な行動制限に入る、という社会的コントロールを今回に準じて行った場合の行政的感染者数変化。(図9)

(Case D) 6月30日に緊急事態宣言を解除した上で、緩やかに β を大きくしていき、6週間後、8月11日には β 値を3月26日直前の状態まで戻し、流行第2波が来るまで活動し、その後(今回に準じた)急速な行動制限に入る、という社会的コントロールを今回に準じて行った場合の行政的感染者数変化。(図10)

結果は概ね以下の通りである。

- (Case A) の場合、5月25日から急速に緩和して6月15日から7月14日まで(30日間)は「3月26日までのレベル」で活動可能である。その後活動制限を行って第2波に対応する。
- (Case B) の場合、5月25日からゆっくりと緩和して7月6日から8月6日まで(32日間)は「3月26日までのレベル」で活動可能である。その後活動制限を行って第2波に対応する。
- (Case C) の場合、6月30日から急速に緩和して7月21日から9月13日まで(55日間)は「3月26日までのレベル」で活動可能である。その後活動制限を行って第2波に対応する。
- (Case D) の場合、6月30日からゆっくりと緩和して8月11日から9月30日(50日間)まで「3月26日までのレベル」で活動可能である。その後活動制限を行って第2波に対応する。

第2波後の活動制限が今回と同様の効果を持つとすると、その期間は概ね2ヶ月となる。

6.3 各パターンの得失の検討

結論から言えば、経済的に自粛期間が延びることは厳しいかもしれないが、6月30日に宣言を解除し、その後早めに活動を再開する(Case C)が一番良かったように思われる。即ち、まずは医療現場が一息つくことができる、そして社会的にもこの問題を解決するためのより

よい戦略を時間を検討する時間ができる。その間にPCR検査の拡大の方策、接触者探知アプリなどを普及周知することなどもできるかもしれない。また、高い活動レベルをより長く維持できるというのはオーバーヘッドが少なく、大きなメリットである。同じ6月下旬解禁でも(Case D)は意外と活動時間が伸びず、少しずつ解除することにはあまりメリットはないようである。

(Case A), (Case B)は、活動できる期間が短い。また、ウイルスが十分に減少していないうちに、社会・経済活動を再開するため、最悪の場合、6月中に行政的感染者が再び増加する可能性がある。また、夏季にはこの数年気候変動が激しく、台風や集中豪雨などの大きな気象災害が頻発しており、もし、気象災害とコロナウイルス感染症の流行時期と活動自粛時期が重なるとさらに苦しい立場に追い込まれる。ただし(Case B)は、徐々に活動度を上げていくので、夏休み中もある程度活動可能であると考えられること、そして「早めに解除して徐々に活動度を上げる」という、政治的に理解が得やすい部分はある点は一定のメリットといえよう。一考の余地はあるかもしれない。

経済的に大変な思いをされている方々に対する施策を何とかあと一月分手当てして(Case C)を目指すのが望ましい方策であったのではないだろうか。(Case C)はきりかえがはっきりしているので一定のルールでコントロールしやすく、わかり易い。今後、どのようにしてさらに β あるいは実行再生産数を下げののかを真剣に検討し、実行に移すと良いと思う。そうすることによって、さらに自由に活動できる時間を延ばすことができる。さらに、感染者数を減少させ、ゼロとすることが究極最善の脱出戦略であることには間違いのないし、(漠然とした感じではあるが)それは不可能ではないと考える。

また、急速な緩和を行うことにより、より早いサイクルで社会・経済を廻して行くことができる点もメリットとして挙げられるので、今後、緩和と制限を繰り返すサイクルの設計・検討においては考慮する余地があると考えられる。

6.4 社会活動のサイクルについて

もう少し踏み込んで考えてみよう。本モデルによる推定・予測感染者数は表6の通りである。この表の示唆するところは、以下の通りである。

表 6: 東京における推定感染者数 (2020年5月20日現在) および予測感染者数 (人)

1月31日	2月28日	2月29日	3月27日	4月8日	5月25日	6月30日
21	795	903	28604	56701	802	11

まず、6月30日解除の大きな利点は、感染者がかなり減っていることで、クラスター対策によって、感染者を0とすることができる可能性があるということである。5月25日解除であると、感染者が十分に減っておらず、クラスター対策を行うには厳しい部分があるのではないだろうか。

さらに、生活パターンについて以下のようなことが考えられる。

(1) 1-2 サイクル (現行のように 5 月 25 日に緊急事態宣言を解除した場合) :

5 月 25 日に緊急事態宣言を解除するという事は、同じ程度の感染者数の 2 月 28 日まで時計の針を巻き戻す、ということである。すると、もし、通常の生活を続けるならば、約 1 月後の 3 月 27 日に相当する、6 月下旬には行動制限をかけ、今回と同様、2 月間の行動制限を行うこととなる。つまり (1ヶ月の活動期間)+(2ヶ月の活動制限期間) で社会をまわしていくこととなる。これを 1-2 サイクルと名づけよう。

(2) 2-3 サイクル (6 月 30 日に緊急事態宣言を解除する場合):

6 月 30 日に緊急事態宣言を解除する、ということとは、感染者数でみて、およそ 1 月 31 日まで時計の針を巻き戻す、ということである。すると、約 2 ヶ月後の 3 月 27 日に相当する、9 月はじめに行動制限をかけ、今回に倣い、そして 3 月間の行動制限を行うこととなる。つまり (2ヶ月の活動期間)+(3ヶ月の活動制限期間) でまわしていくこととなる。つまり (2ヶ月の活動期間)+(3ヶ月の活動制限期間) で社会をまわしていくこととなる。これを 2-3 サイクルと名づけよう。

ここで考えている活動期間の活動はそれなりに活発なもの (2020 年 2 月から 3 月ごろのイメージ) である。活動制限は、3 月 27 日以降、4 月 7 日緊急事態宣言以降のものである、と考えてよい。おそらく、メリハリをつけることやノウハウの蓄積によって、2-3 サイクルを 3-2 サイクルにすることなどもできるのではないかと、思われる。1-2 サイクルについても同様のことは可能であろう。このあたりについては、さらなる検討が必要である。

7 考察とまとめ

とりあえず速報性を重視し、結果をまとめた。本小論で用いたデータはすべて公開されているものである。また、モデルも省略せずに述べているので、ここに書かれていることのみから追試や検証は可能である。今回のパラメータ設定は試行錯誤で定めたものであり、今後さらに精査する必要があるものの、最後の主張 (自粛期間を延ばすことのメリット) についてはそれなりに妥当なものであると考えている。ただし、小中高校の休校は随分長引いているので、自粛の限定的解除は考えても良いかもしれない。今回は大都市型の 3 都府県について解析したが、基本的には各都道府県同じモデルで扱うことは可能である。5 月 30 日に緊急事態宣言が解除されるものと考えていたが、実際には、研究と同時進行形で、5 月 25 日にすべての都道府県で解除された。これまで述べてきたように、この時期の解除は早すぎたのではないかと、憂慮している。解除の妥当性を検証しつつ今後の経過を見守りたい。

今回いくつかのパラメータを決め打ちで設定した。それらのパラメータ設定は一定の合理性はあると思っているが、今後さらに吟味が必要であろう。特にモデルの性質は D に依存する。これが今回設定した 15 より大きいと、より社会的な対応が困難となる。本小論では $D = 15$ を中心に考察をすすめてきたが、 $D = 10$ と $D = 20$ の場合も検討を行っているので、簡単に観察されたことを述べる。

まず、 $D = 10$ とすると、行政的感染者の時系列を適切に再現するのが困難となる。 $D = 20$ とすると、 $D = 15$ の場合と同じように合わせることはできるが、未発症者感染者が感染力を保持しうる期間としては 20 日間というのは若干長めである、という印象がある。この場合、

実効再生産数は3.6と大きくなるが、前節で検討したシミュレーションの結果は大きく変わらない。以上の考察から、 $D = 15$ は概ね妥当な選択であった、と考える。直観的には $D = 15$ は長めだと思っていたので、 $D = 10$ よりも妥当な結果を与える、というのは少々意外であった。 C が20程度であることを考えると、およそ感染者の95%を未発症感染者が占め、感染者は2週間程度は感染力を持ちうる、そして感染者の1%程度が重症化する、という本感染症の具体的な病態が浮かび上がってくる。

さて、これからの社会活動の適正値を保つためには $\beta(t)$ の値をモニターすることが重要であるが、今回のモデルのあてはめでは、自粛がすすむに伴い $\beta(t)$ の値は等比級数的に減少しているとすると、ある程度現実を説明できることがわかった。この知見に基づいて、交通機関の利用率なども利用しながら簡単な関数で β を推定することなども可能であろう。

感染者が少なく終息したと思われる時にも、 $\beta(t)$ の値をきちんとモニターすることが非常に大事である。このような時の $\beta(t)$ の推定は毎日陽性者が発生していない、時折ぽつぽつと観測される状況で行われることになるが、そのための方策として、 $\beta(t)$ を状態変数として、日々の陽性者発生数を観測変数とする状態空間モデルをたてて統計的パラメータ推定を行うことなどが考えられる。もちろん、大規模にデータを収集する上でのICT技術の活用も重要である。

本感染症は、多くの未発症感染者が存在することが大きな特徴である。蔓延のメカニズムや実態を把握し、再流行の予兆を早く掴むためにも、PCR検査の拡大や各地での大規模な抗体検査の実施は非常に重要である。 $\beta(t)$ や C の適切な推定やそれを通じた予測の改良などにも役に立つ。今回の2つの抗体検査は無作為抽出に近いと思われるが、医療機関利用者から検体を採取しているのだから、完全無作為とはいえず、少し高めに陽性率がでる可能性はある。それは C の推定値に影響する。 C の推定は感染対策上は重要と思われるので、そのためにも、大規模な抗体検査の早期実施は必要なのではないだろうか。また、PCR検査の拡大に伴い、流行期には膨大な数の未発症感染者が出る可能性がある。これらの未発症感染者を隔離する必要があるが、自宅隔離にするのか、ホテル等を用意するのか、きちんと検討する必要がある。

流行する際には指数的に増えるので、感染発生から行政による発症者の把握までに12日のずれがある、というのは致命的になりかねないので、早急に改善した方が良く考える。10日単位の状況把握の遅延は大きな違いをもたらす。早期に対応することで、発症者の山がずっと小さくなり、医療にも余裕ができ、より早い社会的活動の復活が可能となる。まさにwin-win-winである。つまり、早期に急速に活動制限や自粛を強化して一定レベルに落とすことが、このwin-win-win 関係を実現する上で重要である。「早期発見、早期治療」に勝るものはないのである。4月の対応の遅れが社会に大きな混乱をもたらしたことを教訓として、そのようなメッセージをより明確に政府は出すことが求められていると思う。これを機会に、天気予報のような、本感染症のモニターシステムを公的機能の一部として構築することが望ましい。どのような仕様がシステムに求められるかは本小論のレベルを超えるので、また別に検討の機会を譲りたい。

今後、もしかすると、気温の上昇に伴い、ウイルスが少し不活性化する可能性はありうると考える。もしそうであるとすれば、新型コロナウイルスがドラスティックになることはないとしても、 β の値が少しでも減少するとすれば、それは毎日の感染を定める β のベース

ラインを下げることになるので、その影響は良い方に働き、無視できないものとなるを考える。気温上昇によるウイルス活性低下の可能性は、注意深く検討する価値はあろう。

本小論では、感染症の態様を表すいろいろなパラメータ、たとえば $C = 23, D = 15$ 等について、データとモデルの整合性という立場で推定を行ったが、これらは最終的には疫学調査の結果によって定まるべきものである。今後の動向について注視していきたい。

最後に、プリンセス・ダイヤモンド号での感染は、ここで解析した一般社会での感染状況とはまったく異なる非常に特殊な状況ではあるが、さまざまなデータが取得されている筈で、そこから学ぶことは多いものと思われる。例えば、発症者感染者と未発症(に終わる)感染者の間の他人への感染力の違いなどについて研究する上で貴重なデータなのではないだろうか。

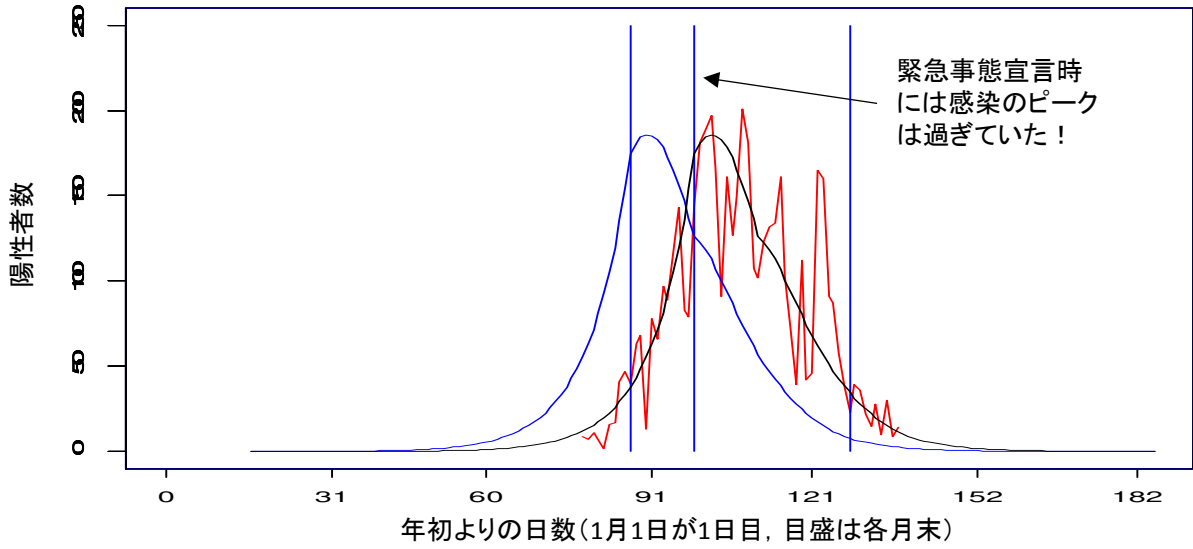
8 謝辞

本稿を用意するきっかけを作り、さまざまな視点からご助言を賜った、伊藤哲朗東京大学生産技術研究所客員教授(元内閣危機管理監)、野城智也東京大学生産技術研究所教授、藤井健東急総合研究所顧問をはじめとする危機管理研究会の皆様感謝いたします。また、合原一幸東京大学特別教授、小原敦美福井大学工学部教授からも貴重なご助言をいただきました。心より御礼申し上げます。なお、本研究は、筆者が研究代表者を努める政策研究大学院大学政策研究センターリサーチプロジェクト“政策科学におけるデータサイエンスと数理モデリングの活用と深化”の一環として実施されたものである。

参考文献

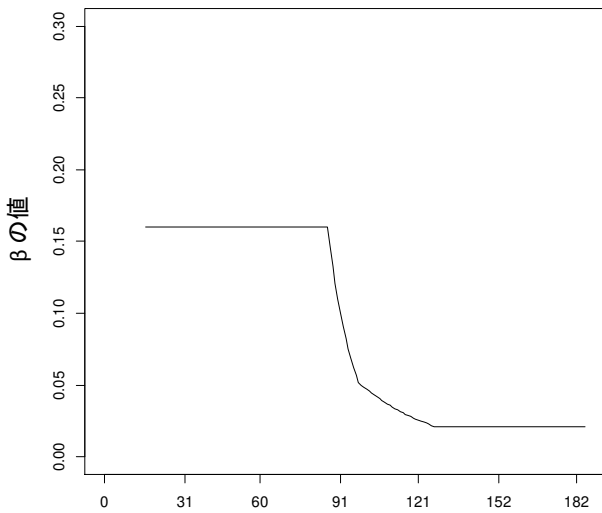
- [1] 稲葉寿: 微分方程式と感染症数理疫学, 数理科学, Vol. 46, No. 4 (2008) pp.19-25.
- [2] 厚生労働省 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議: 新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言(2020年5月1日).
<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000627254.pdf>.
- [3] 東京大学先端科学技術研究センター: 東京都の抗体陽性率検査結果について(プレスリリース, 2020年5月15日). [HTTP://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/ja/news/release/20200515.html](http://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/ja/news/release/20200515.html)
- [4] 大阪市立大学: 新抗体価測定システムが高い精度で陽性を判定! ~疫学調査により、大阪では1%程度が抗体を保持~(プレスリリース, 2020年5月1日). https://www.osaka-cu.ac.jp/ja/news/pdfs2020/press_200501.pdf
- [5] Asako Doi, Kentaro Iwata, Hirokazu Kuroda, Toshikazu Hasuike, Seiko Nasu, Aya Kanda, Tomomi Nagao, Hiroaki Nishioka, Keisuke Tomii, Takeshi Morimoto, Yasuki Kihara: Estimation of seroprevalence of novel coronavirus disease (COVID-19) using preserved serum at an outpatient setting in Kobe, Japan: A cross-sectional study. medRxiv preprint doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.26.20079822>.

- [6] Morihito Takita, Tomoko Matsumura, Kana Yamamoto, Erika Yamashita, Kazutaka Hosoda, Tamae Hamaki and Eiji Kusumi: Preliminary results of seroprevalence of SARS-CoV-2 at community clinics in Tokyo. medRxiv preprint doi: <https://doi.org/10.1101/2020.04.29.20085449> .
- [7] 西浦博：厚生労働省における記者会見. 2020年4月15日.



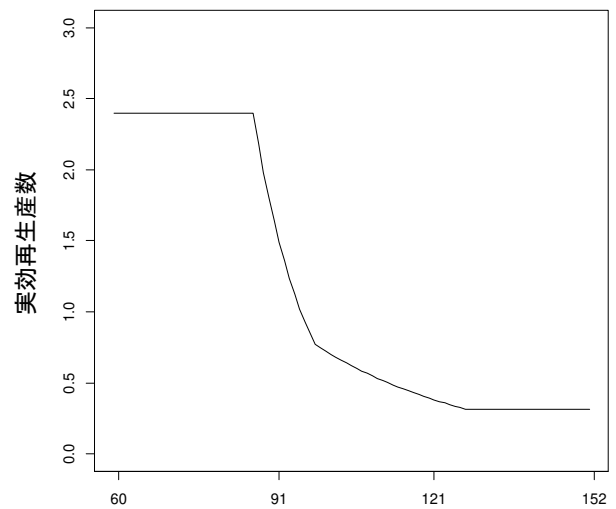
(a) 行政的感染者発生数の推移
 赤:実データ, 黒:推定,
 青:行政的感染者が実際に感染した日の推定結果
 青縦線
 (左) 3月27日(東京で感染者が急激に増加しだした時期).
 (中) 4月7日(緊急事態宣言発令日).
 (右) 5月6日(GWの最終日).
 これら3日で β の減少傾向が変化すると想定.

比率



年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(b) β の値の推移



年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(c) 実効再生産数の推移

図1 東京都の推定結果

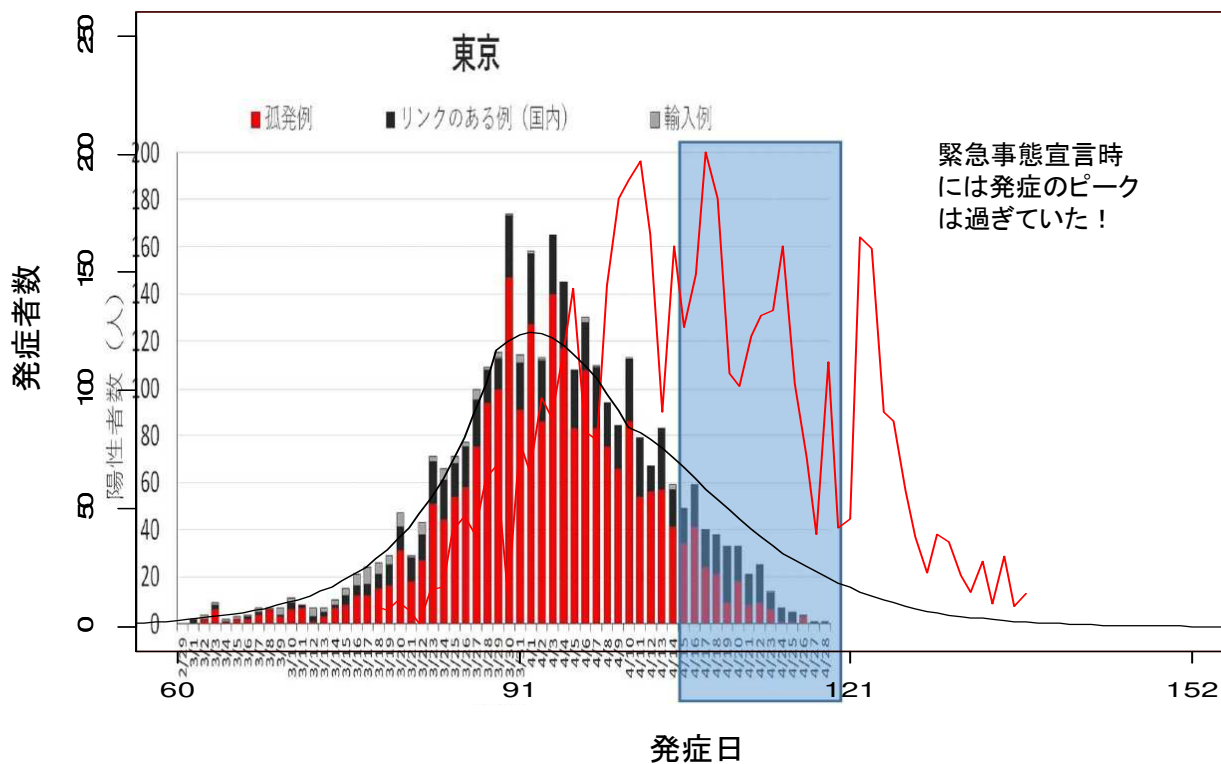
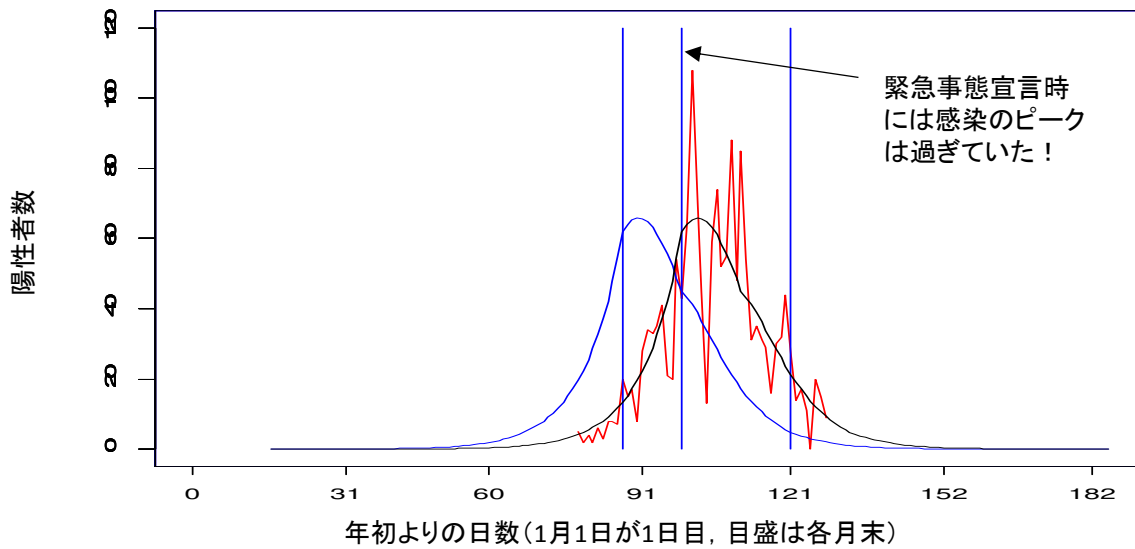
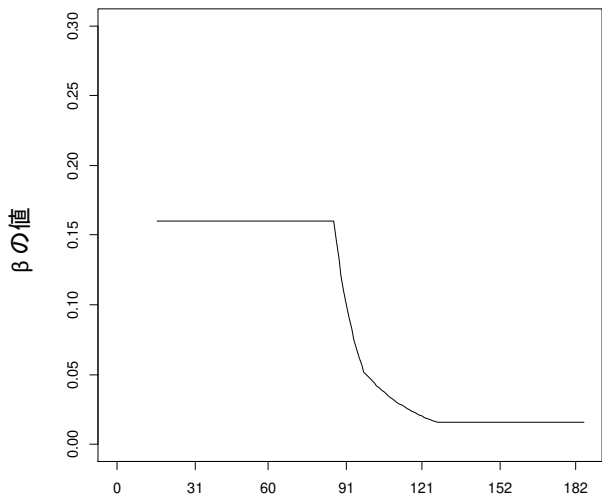


図2 東京都の日ごとの発症者数(ヒストグラム)とモデルによる推計(黒線).
 ヒストグラム: 専門家委員会により報告された日ごとの発症者数.
 赤折れ線グラフ: 行政的感染者数(実データ).
 黒線: モデルによる発症者の日ごとの推定値.
 (青色部分はまだ発症者の調査が終わっていない可能性がある期間.)
 [本図は, 参考文献[2] 厚生労働省新型コロナウイルス感染症対策専門家会議:
 新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言(2020年5月1日)p.3の図に筆者の
 作成した図をスケールを合わせて重ねたものである.]

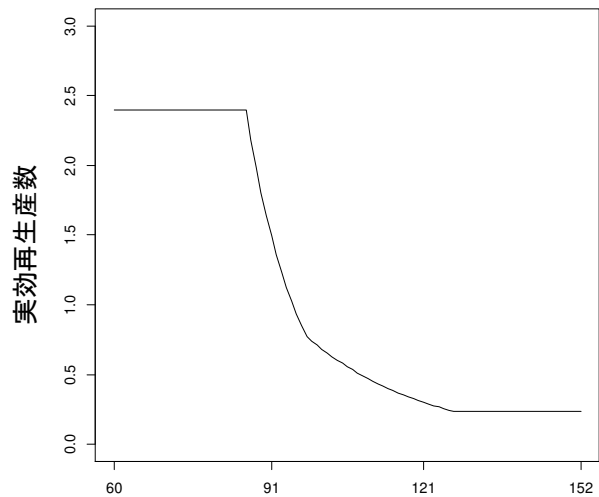


(a) 行政的感染者発生数の推移
 赤:実データ, 黒:推定,
 青:行政的感染者の実際の感染日の推定結果
 青縦線
 (左) 3月27日(東京で感染者が急激に増加した時期).
 (中) 4月7日(緊急事態宣言発令日).
 (右) 5月6日(GWの最終日).
 これら3日で β の減少傾向が変化すると想定.



年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

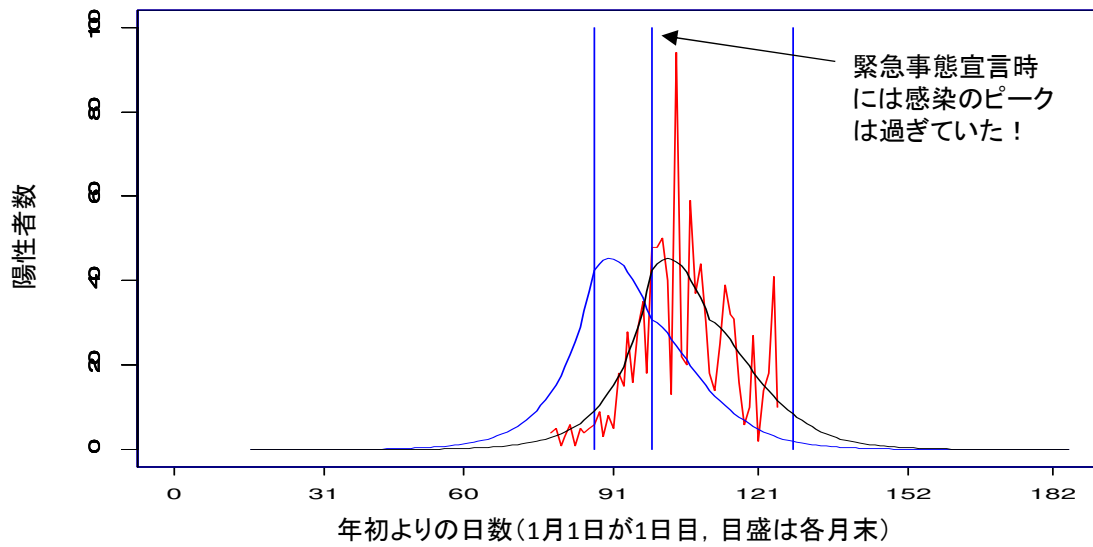
(b) β の値の推移



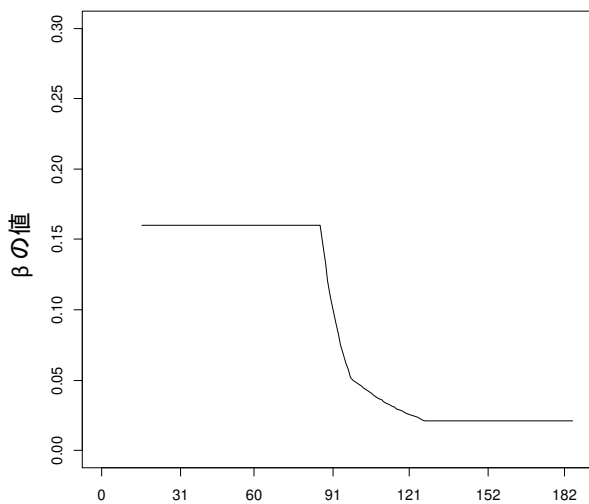
年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(c) 実効再生産数の推移

図3 大阪府の推定結果

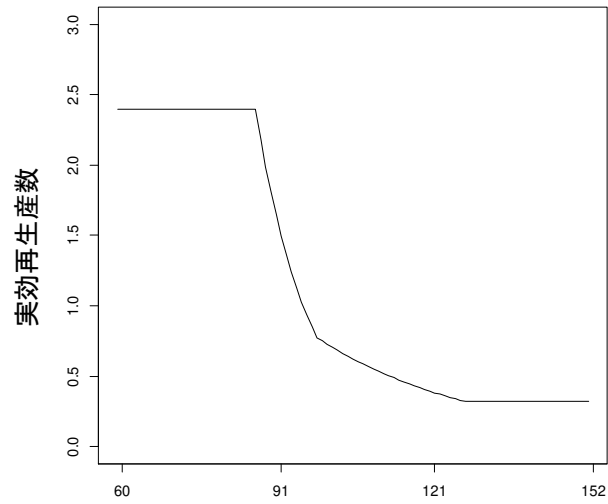


(a) 行政的感染者発生数の推移
 赤: 実データ, 黒: 推定,
 青: 行政的感染者が実際に感染した日の推定結果
 青縦線
 (左) 3月27日(東京で感染者が急激に増加した時期).
 (中) 4月7日(緊急事態宣言発令日).
 (右) 5月6日(GWの最終日).
 これら3日で β の減少傾向が変化すると想定.



年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

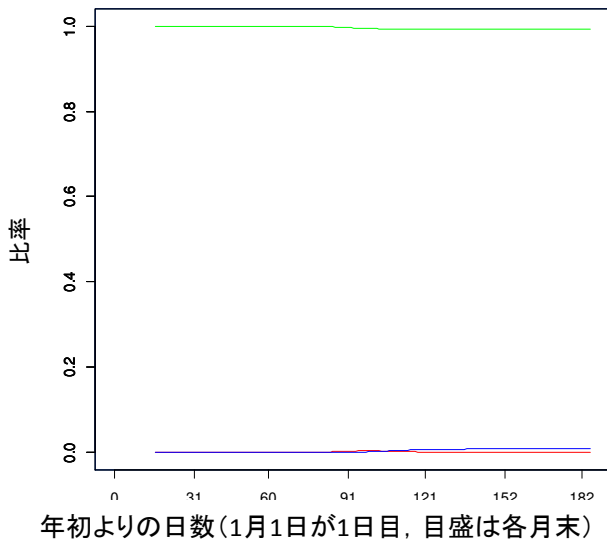
(b) β の値の推移



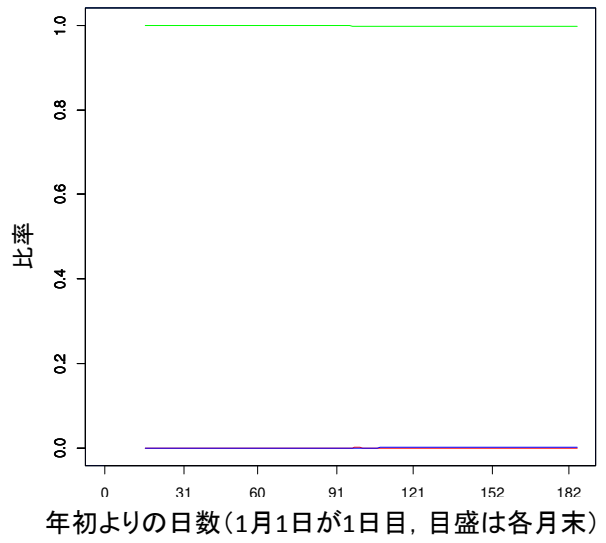
年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(c) 実効再生産数の推移

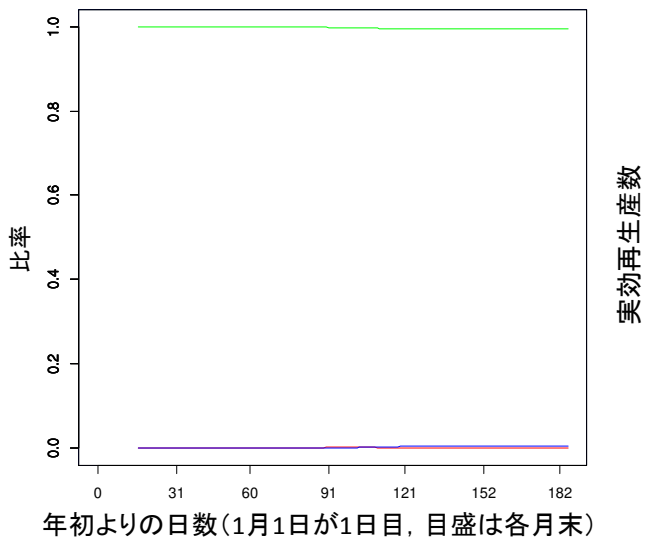
図4 神奈川県 の推定結果



(a) 東京都



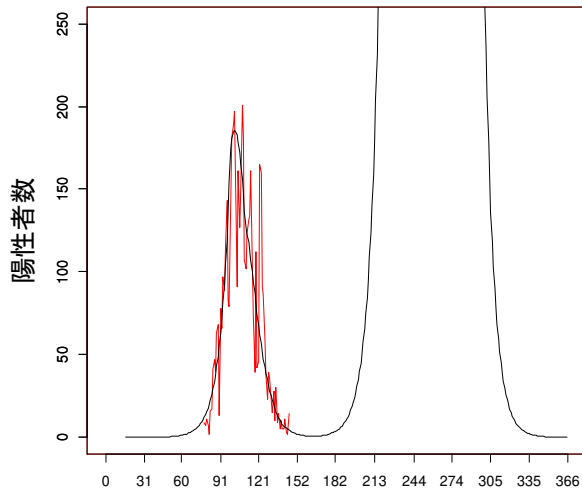
(c) 神奈川県



(b) 大阪府

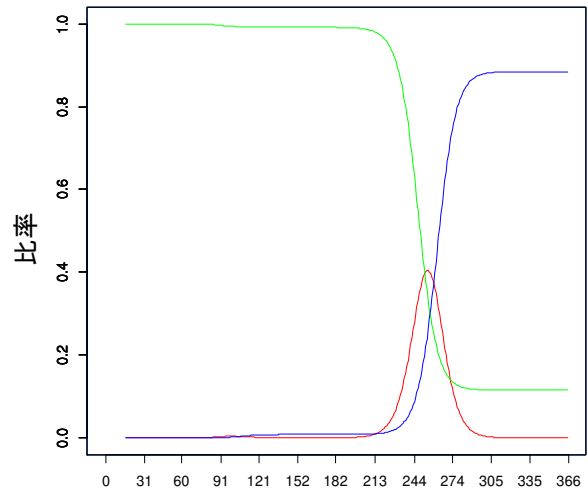
実効再生産数

図5 各都府県の未感染者(緑), 感染者(赤), 免疫保持者(青)の推移



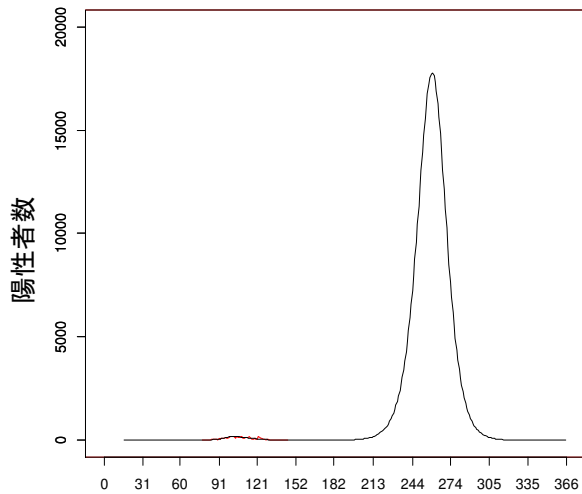
年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(a) 行政的感染者数の推移(図1と同じスケール)



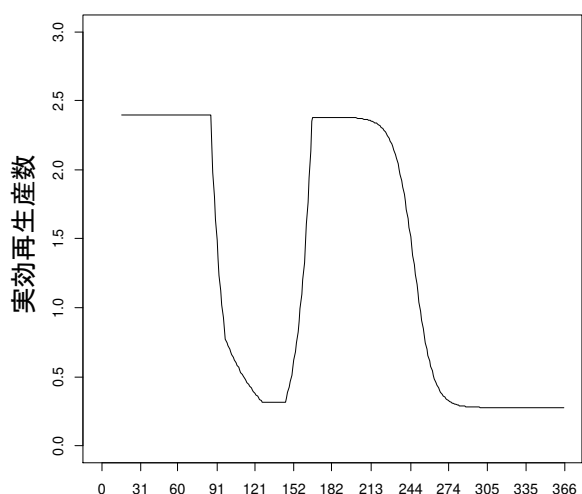
年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(d) 未感染者(緑), 感染者(赤), 免疫保持者(青)の推移



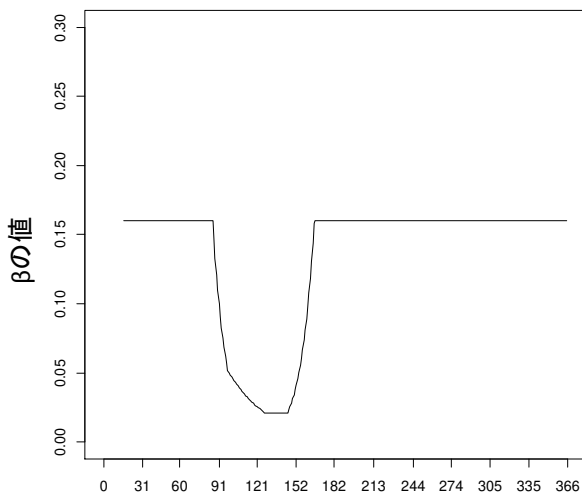
年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(b) 行政的感染者数の推移((a)と同じものだがスケールを変えて全体が入るようにしたもの)



年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

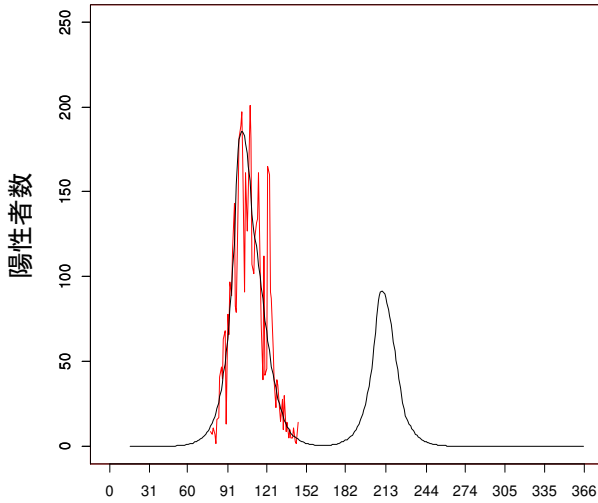
(c) 実効再生産数の推移



年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

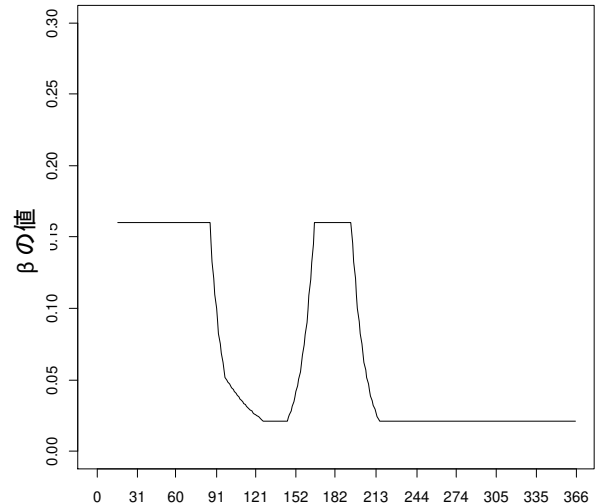
(e) β の推移

図6 5月31日以降行動制限を行わない場合に起こる感染爆発の様子(東京)



年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(a) 行政的感染者数の推移

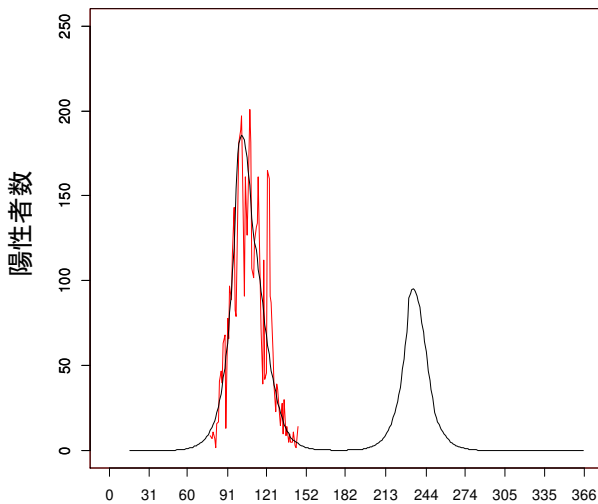


年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(b) β の値の推移

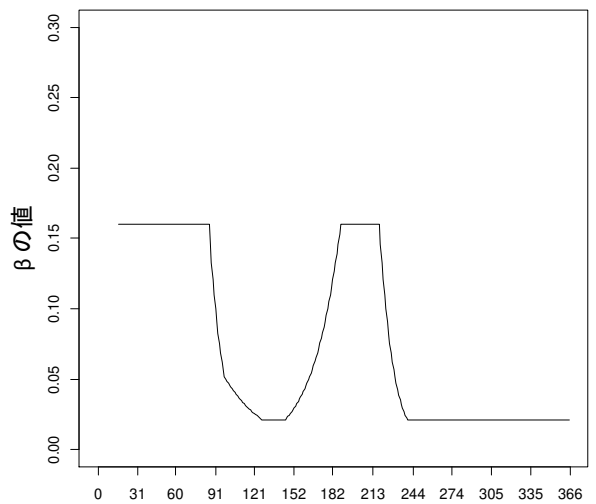
(6月15日から7月14日まで(30日間),
3月26日までのように活動可能)

図7 5月25日に解除して6月15日には3月26日までの活動レベルに戻し、第二波の時には最大1日100名程度行政的感染者が出るとした時の東京のシミュレーション



年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(a) 行政的感染者数の推移

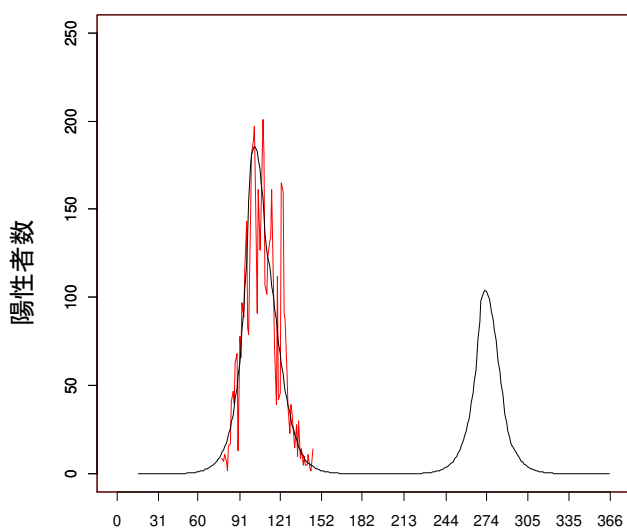


年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(b) 実効再生産数の推移

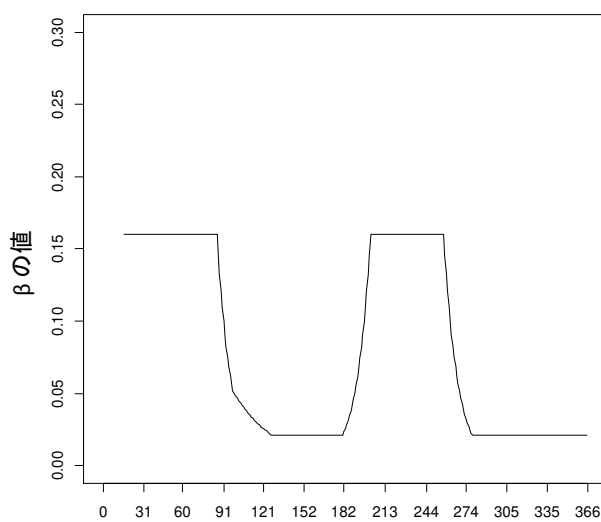
(7月6日から8月6日まで(32日間),
3月26日までのように活動可能)

図8 5月25日に解除して7月6日までかけて3月26日までの活動レベルに戻し、第二波の時には最大1日100名程度行政的感染者が出るとした時の東京のシミュレーション



年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(a) 行政的感染者数の推移

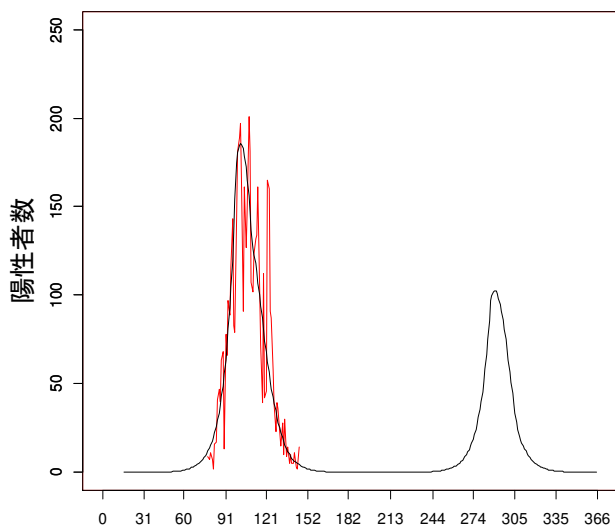


年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(b) β の値の推移

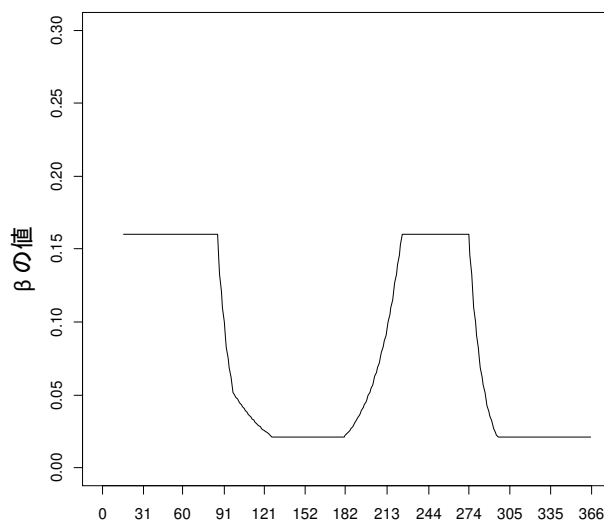
(7月21日から9月13日まで(55日間),
3月26日以前のように活動可能)

図9 6月30日に解除して7月21日までかけて3月26日までの活動レベルまで戻し、第二波の時には最大1日100名程度行政的感染者が出るとした時の東京のシミュレーション



年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(b) 行政的感染者数の推移



年初よりの日数(1月1日が1日目, 目盛は各月末)

(b) β の値の推移

(8月11日から9月30日(50日間),
3月26日以前のように活動可能)

図10 6月30日に解除して8月11日までかけて3月26日までの活動レベルまで戻し、第二波の時には最大1日100名程度行政的感染者が出るとした時の東京のシミュレーション