

COVID-19 Infection Diffusion Analysis based on Human Behavior Model and Infection Diffusion Network

吉田 直人^{*2}
Naoto Yoshida

Graduate School of Science and Technology, Keio University

COVID-19 感染問題における感染拡散状況の把握と予測を行うため、SNS(Twitter) での COVID-19 に関するツイートと報道番組での報道内容の分析を行い、その結果を一般的に幕乗則に従う人の行動様式に組み込み、独自の人の行動モデルを提案した。そして、これを複雑ネットワーク(スモールワールド型)として構築した実環境を模した人の移動ネットワーク上で、典型的な感染モデルである SERI モデルにて感染拡散シミュレーションを実施した。その結果、昨年からの感染状況の再現が可能であることが分かった。本稿では、さらに、このモデルによる緊急事態宣言の効果やその解除時期について、そして、ワクチンの接種率や摂取方法の効果についても考察する。

1. はじめに

1905 年のペストの流行をうまく再現出来るモデルとして SIR モデルが提案されたのは 1927 年である [Kermack 1927]. その後も 2002 年の SARS や 2012 年の MERS など、新型ウィルス世界的な流行に我々は度々遭遇してきたが、今回の COVID-19 の感染流行は日本にとっても対岸の火事どころかまさに国難となっている *1. 感染者数などの感染状況の詳細を把握することは現実的に困難な状況であり、そもそも実世界は大規模複雑系である。現在起きていることもただ一度の現象に過ぎず再現性はない。このような状況にて、直近の予測であれば統計手法は有効であり、実際に Google の感染者数予測などが公開されている *2

しかし、感染を拡大させる最大の要因は「人の移動による人と人との接触」であり、感染者数などの客観的なデータからは、人の行動変容に基づく感染拡散の変化までを捉えての予測は極めて難しい。その点、SIR モデルは人と人との接触に基づく感染モデルであり、現在までにおいて、潜伏期間を導入した SEIR モデルや再感染も再現できるモデルなど、様々なモデルが提案されている（後述する）。著者もこれまで SNS におけるデマや風評が拡散するモデルを提案しているが [ikededa 2018], 今回は SEIR モデルを利用している。しかし、SIR モデル系列の感染モデルはあくまで人と人が接触することで感染するしないに特化したモデルであり、現実での人の移動や、人の移動の仕方、行動変容などはモデルの範疇外である。そもそも 1927 年当時は鉄道や航空機もなく人が短時間で移動することは想定しなくても問題なかったのであろうが³、現在はこれらを考慮する必要がある。

そこで、本研究では、代表的な SNS である Twitter でのツイートの内容と、報道番組での報道内容の分析から「人の行動モデル」をまず提案する。そして、感染は人の移動が出发点であることから、人の移動ネットワークを構築し、そのネットワーク上で、人を人の行動モデルに従って移動させ、人と人と

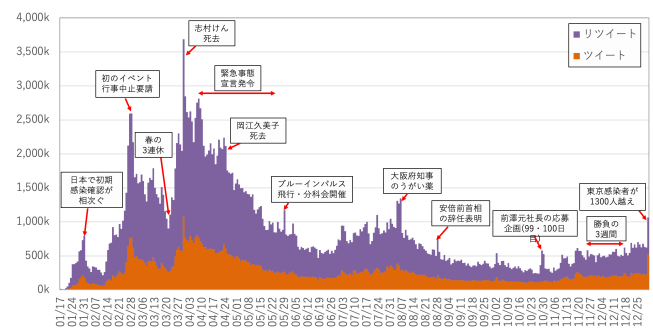


図 1: ツイート数の変化

の接触時に SEIR による感染拡散を起こすシミュレーションを実施した.

以下、構築したシミュレーション環境について説明し、昨年1月からの感染状況の再現結果、並びに、今後の予測、すなわち緊急事態宣言解除の時期と解除の仕方、そしてワクチン接種戦略についてのシミュレーション結果について考察する。

2. SNS と報道から分かること

2.1 Twitter 分析からの導出

まず図1に昨年1年間のCOVID-19に関するオリジナルツイートならびにリツイート数の変化を示す^{*3}。ツイート本文中に「新型肺炎」、「コロナ」、「ウイルス」、「ウィルス」、「武漢」のいずれかが含まれているもの、もしくは、いずれかのハッシュタグの文中に「新型肺炎」、「コロナ」のどちらかが含まれているものである。期間中におけるツイート数は92,764,825件、リツイート数は209,937,095件であり、合計件数は302,701,920件である。

総じて分かることは、第1波の時こそ、ツイート数が多かったが、その後、2波3波とより大きな感染の波が到来したにも関わらず、ツイート数は減少する一方であった。特にオリジナルツイートとリツイートの比に着目すると、リツイートされる割合も減少する一方である。また、「不安」「怖い」「死ぬ」「かかる」「大変」といった単語の出現回数も、第1波のころに顕

連絡先: 栗原 聡, 慶應義塾大学理工学部, 〒 223-8522
神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, tel:045-566-1714,
satoshi@keio.jp

*1 <https://corona.go.jp/>

*2 <https://datastudio.google.com/u/0/reporting/8224d512-a76e-4d38-91c1-935ba119eb8f/page/ncZpB>

*3 Twitter データは東京大学鳥海研究室から提供.

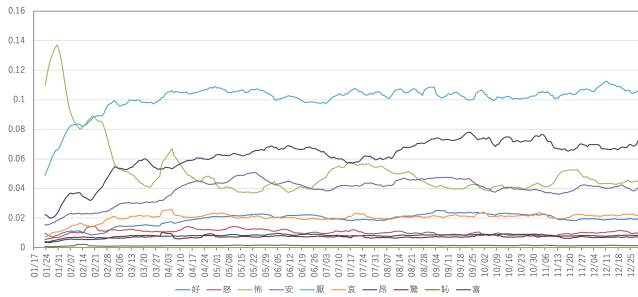


図 2: ツイートの感情の変化

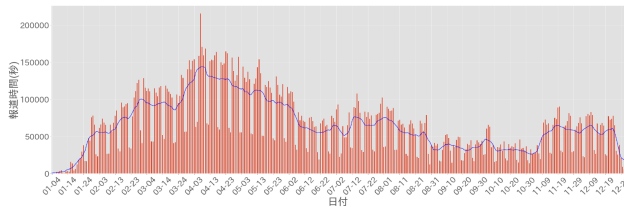


図 3: 報道時間の推移

著に見られたもののその後はひたすら減少している。

次に図 2 に個々のツイート文に対して感情分析を行った結果を示す。分析には ML-Ask[Michal 2017] を使用し、個々のツイートを 10 種類の感情、「喜」、「怒」、「哀」、「怖」、「恥」、「好」、「厭」、「昂」、「安」、「驚」に分類したものである。第 1 波のころは「怖」の感情が顕著であった反面、「喜」は低い。しかし、その後は「怖」は低下する一方であるのに対して「喜」は逆の動きとなっている。

これらの分析から、第 1 波のころとその後において我々のコロナウィルスに対する見方が大きく変化したことが推察される。一昨年末、武漢にて正体不明のウィルスの感染拡大というニュースが世界中に与えた不安は大きかった。それでも日本にとっては対岸の火事であったものの、翌年となり、1 月 15 日に初めて国内での感染が見つかった時は、いよいよ国内にウィルスが入ってきたということで、報道の過熱ぶりもすさまじく、ツイート数も多かった。しかし、不安の正体が新型コロナウィルスであり、どのような発症であり、どのように治療するのか、そして、疾患を持つ人は重症化する可能性が高い一方、若年層には感染しても無症状であったり重症化しにくい、といった情報が報道や SNS で拡散されることで、漠然として不安が一気に解消されていく。そうすると、もはや 2 波 3 波が到来しても、第 1 波のような、動物的な本能がかき立てる不安という感情が再び強くなることはなく、人は合理的な考えに従った行動とするようになる。

つまり、初回の緊急事態宣言の時は、宣言が発出されたから皆が自粛したのではなく、漠然として不安や恐怖といった感情が強かったことが、全体的な能動的な自粛を誘発したのである。我々も動物であり、本能的に危険を避けようとする行動であった度合いが高かったのであろうと推察できる。

2.2 報道番組分析からの導出

SNS に加え、COVID-19 に関する情報が報道番組においてどのように取り上げられたかについても分析を行った。TV 番組と CM データの調査・分析・配信を行っている株式会社エ

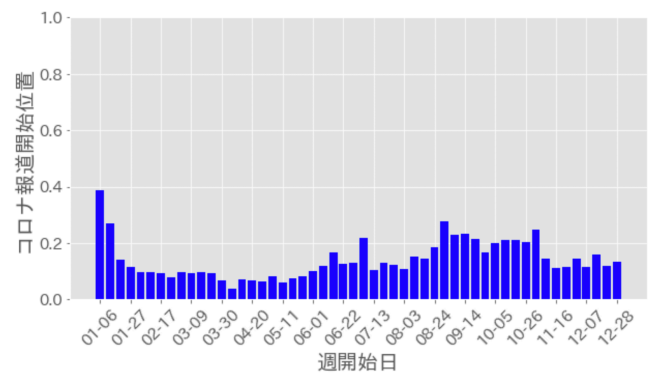


図 4: 番組内での報道開始位置の推移

ム・データ^{*4}、および株式会社インテージ^{*5}より提供いただいたデータを使用した。図 3 から、明らかに分かることとして、第 1 波の頃と比べて、その後の 2 波 3 波となっても総報道時間がひたすら減少している。かろうじて第 3 波が到来した 11 月以降多少報道時間が増加している程度である。

そして、図 4 には、個々の報道番組において番組が始まってからどのタイミングで COVID-19 に関する報道が開始されたのかの時間推移を示した。縦軸の値が低いほど最初の方で取り扱われたことを意味する。すると、第 1 波の 3 月から 5 月にかけては総じて値が低くなっていることが分かる。

つまり、我々国民が情報を発するメディアである SNS から、そして、国民に情報と伝える側である報道からも、第 1 波とそれ以降においては我々の COVID-19 に対する見方が大きく変わったことが明らかに推察できる。そこで、次節において、これらの推察を反映した人の行動モデルを提案する。

3. 冪乗則に基づく人の行動モデル

我々人の移動や行動は一般に冪乗則 ($C/x^{-\alpha}$) に従うことが知られている。移動距離であれば、日常生活における我々の移動はほとんどは近距離の移動、すなわち通勤・通学や日常的な買い物であるものの、またに発生する出張などで新幹線や航空機を使った遠距離移動をする、ということである。著者であれば、自宅と大学間の移動が圧倒的な割合であるものの、年に十数回は数百キロを移動しての国内出張、そして、年に数回は数千キロを移動しての国際会議移動が発生する、といった具合である。無論、コロナ禍である現在は、海外出張はないものの、国内移動は頻度は少ないもののやはり発生しているし、普段と異なる移動ということでは、講演などでの普段と異なる移動も頻度は少ないものの発生している。

そして、冪乗則の別の解釈としては、ほとんどの人はあまり遠距離移動しないものの、ごく少数の人においては頻繁に長距離移動している、という見方もできる。

冪乗則において重要なのが冪指数の α である。この値が大きければ大きいほど長距離移動の頻度が低くなる。つまりは昨年の 4 月の緊急事態宣言の時のような、皆が移動の自粛をした状況である。一方、その後、人々の移動はアクティブとなり、第 2 第 3 と大きな感染の波となってしまった状況では α の値が小さくなってしまったと考えることができる。ここで重要なのが、第 1 波とそれ以降で α の値を変えた要因、別の言い回しをすれば行動変容をもたらした要因は何なのか、ということ

*4 <https://mdata.tv/metadata/>

*5 <https://www.intage.co.jp/>

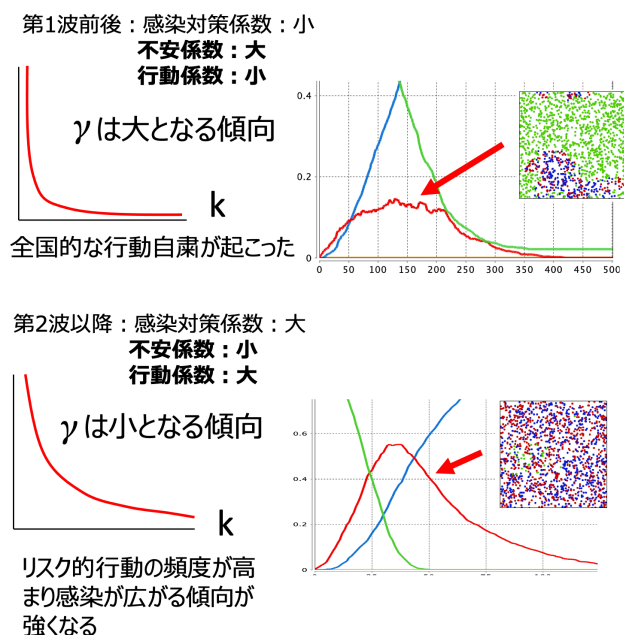


図 5: 冪乗則に基づく人の行動モデルでの感染拡散

になるが、それが上述した Twitter や報道番組分析から推察することができる。

我々の自律神経系は、交感神経と副交感神経という 2 つの神経の綱引きにより構成されるが、我々の行動したいという欲求も、不安的要因からくる行動を自粛しようとする動機と、合理的解釈に基づき行動しようとする動機の綱引きによって、実際に行動する度合いが決まると考える。2 つの要素をそれぞれ、不安係数と行動係数として表現すると、人の行動モデルを次のように書くことができる。

$$p(k) \propto k^{-\left(\frac{\text{不安係数}}{\text{行動係数}} \times \text{感染対策係数}\right)}$$

- 不安係数：未知に対する脅威がある状況で高く、脅威が去ると急激に低下する（動物的本能に近いもの）
- 行動係数：若年齢ほど大きくなる（社会経済的な行動欲求）※不安要素がなくなることで上昇する。
- 感染対策係数：マスクや三密防止策で上昇する

不安係数が高いほど、そして行動係数が低いほど、 γ が大きくなり、人が行動しない傾向が強くなることを表現することができる。つまり、Twitter や報道番組分析から推察されることとして、第 1 波の頃は漠然として不安が大きく、緊急事態宣言のあり行動係数が低かったことから、人々の行動が抑制され、1 波は収束した。Twitter 分析からは、有名人の訃報も結果的に効果があったと推察される。

しかし、その後は不安感は薄れる一方、つまりは不安係数は感染者数の増加による微増はあれども、行動係数は上昇し、「マスクさえすれば仕事は大丈夫である」といった合理的判断に基づいて行動するようになり γ は小さくなり、結果として人と人の接触が増え、感染が拡大することとなった。図 5 に γ が小さい時と大きい時の SEIR モデルによる感染の変化を示す。

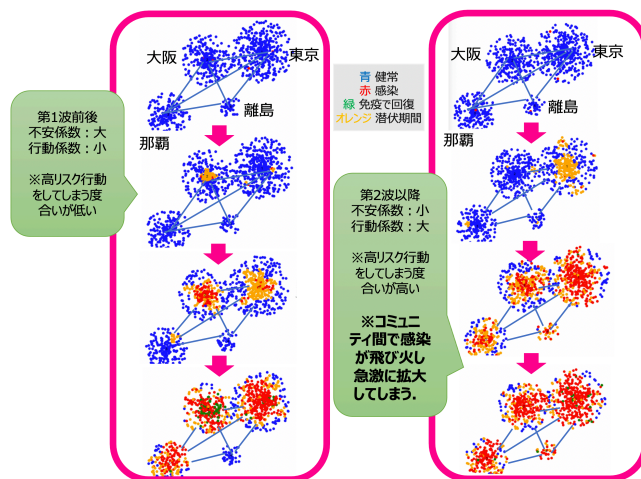


図 6: スモールワールド型の感染ネットワーク

4. 人の移動ネットワーク

上記、人の行動モデルに加え、現実の感染拡散を理解するにはもう一つの要因が必要であり、それがあつて、第 2 波よりも大きな第 3 波のような感染の拡大が発生することを説明できる。病気の感染は人と人の接触で発生する。こと COVID-19 については飛沫感染が主たる感染経路である。日常生活において頻繁に会うメンバー集合をコミュニティと呼ぶとすれば、コミュニティに対して、外から感染が持ち込まれなければそのコミュニティに感染が蔓延することはないのであり、コミュニティからコミュニティに感染が伝播し、感染が持ち込まれたコミュニティ内では急速に感染が蔓延する。これがクラスターと呼ばれる現象である。つまり、我々の感染ネットワークはランダムなものではなく、密なコミュニティがお互いに接続されたスモールワールド型のネットワークであり、スモールワールド型の感染ルートにて感染が拡散するのであり、感染シミュレーションにおいても、同様の感染ネットワークを構築する必要がある。

図 6 にシミュレーションを試行した例を示す。これは東京や大阪といった大都市と、沖縄などの離島を模した感染ネットワークである。東京コミュニティも複数のコミュニティのネットワークとして生成されており、東京も新宿や渋谷といったコミュニティの集合体として構成されてくることを再現したものである。そして、東京と那覇は一つの辺でのみ接続される。これが航空機や電車による移動ルートである。スモールワールドネットワークではショートカットとか弱い紐帯などと呼ばれる。

そして、この感染ネットワークにおいて個々のエージェントが上述する行動モデルに基づきべき則的に移動し、エージェント同士の接触時での感染は SEIR モデルに従うことでの感染拡散シミュレーションを行った際の感染の推移を示した。左は第 1 波前後、右がそれ以降である。左では離島に相当するコミュニティには感染が飛び火しなかったが、右では感染が飛び火し、コミュニティ全体に感染が蔓延してしまっている。これがより大きな感染拡散を起こす仕組みであると考えられる。

5. 第 1, 2, 3 波の再現

上記提案する人の行動モデルと感染ネットワークを用い、昨年の第 1, 2, 3 波の再現を試みた結果を図 7 に示す。

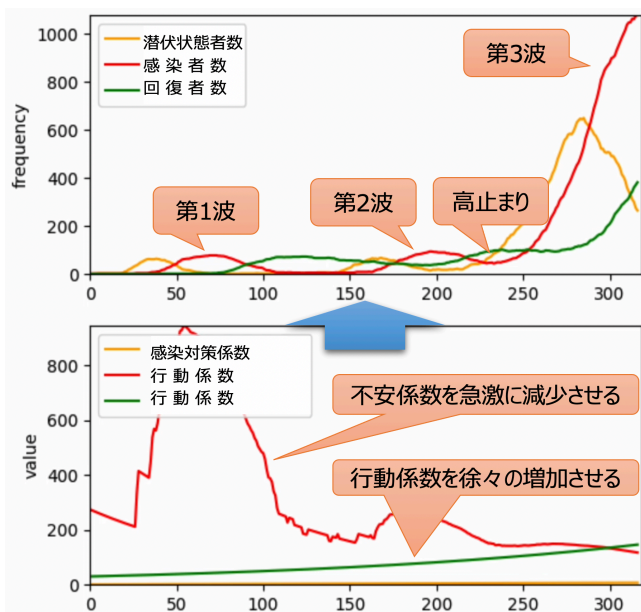


図 7: 1, 2, 3 波の再現

図 (上) が感染者数の変化, 図 (下) に上述した不安係数, 行動係数などの変化を示す。不安係数は第 1 波の頃は高く, 指数関数的に減少させるものの, 感染者数の増加に対して対数スケールで上昇させる関数とし, 行動係数は単調増加関数としている。

感染モデルには SEIR モデルを利用しており, いわゆる SIR モデルを基礎とする一連の感染モデルでは回復すると再感染することはないことから, 本モデルでは一定期間の経過をもって再感染可能としている。この設定があることで複数の感染の波の再現が可能となる。この部分が現実での 1, 2, 3 波の発生と大きく異なる。現実での 1, 2, 3 波に関わった人はそれぞれ異なり, 1, 2, 3 はそれぞれ異なる感染である。現実での人口に対して感染に関わった人数ははるかに少ないが, シミュレーションではほぼ全エージェントが感染するからである。

図 7 から分かるように, ほぼ 1, 2, 3 波の再現ができています。特に 2 波と 3 波の間の感染者の高止まりや, 2 波より大きな 3 波の感染拡大などが再現され, べき則に基づく人の行動様式と, スモールワールドネットワーク型の感染ネットワークを組み合わせることが, 現実の感染拡大を説明するための基本的な要因である可能性を示すものである。

6. 緊急事態宣言解除+ワクチン接種導入でのシナリオ

構築した感染シミュレータを利用して, まず, 緊急事態宣言解除のタイミングと感染拡大の関係について, ワクチン接種を前提としたシミュレーションを実施した。図 8 に結果を示す。

緊急事態宣言の実施は, シミュレーション環境においては「行動係数の値を下げることを意味する。そこで, 宣言期間中の行動係数を 7 割減少させることとした。図 (右) は 2 月中に解除, 図 (左) が東京オリンピックを意識し, 8 月まで継続させた場合である。ワクチン接種については, 5 月から 3 ヶ月かけて摂取率 100 % となる算段でシミュレーションに反映させた。具体的には摂取したエージェントの再感染までの期間を

1 年とした。

8 月まで継続したとしても, 昨年初回の 4 月のように感染が収束することはない。もはや不安係数は低下し, 行動係数もゼロまで低く設定することはできないからである。それでも早々に解除すると比べるとはるかに感染を抑えることができる。ただし, 早期に解除したとしても, 最終的には全エージェントがワクチンを接種し, 再感染ゼロとなることから感染は収束することになる。

7. ワクチン接種率 60 %での感染状況予測

ワクチン接種については, 最終的な摂取率が 100 % となることは想定しがたく, そこで, 最終的に 60 % 程度の人が摂取すると想定してシミュレーションを実施した結果が図 9 である。図 (上) が摂取率 100 %, 図 (下) が摂取率 60 % である。左が緊急事態宣言解除を 8 月, 右が 2 月とした場合である。摂取率が 60 % では仮に自粛を 8 月まで継続したとしても感染の拡散が収束することはない。4 割はそれまでと同じく感染を拡散させるからである。しかも人の行動はべき則に従う。すなわち, 仮に 90 % が摂取したとしても感染が 9 割収まることにはならないのである。

この結果から, ワクチン接種戦略として考えられるのが, まず医療関係者と疾患を持つ人への接種は優先として, 現在ではその次は 3600 万人という高齢者への接種, そして一般人となっているが, 高齢者よりもアクティブに移動する若年層や経済を支える中間層への摂取を優先すべきであろうという考え方である。集団免疫化するためのワクチン接種率に到達するには現実にはかなりの時間を要するであろうこと, 感染を拡散させる側の感染力を低下させること, そして何より経済を回すことを考慮すれば妥当な戦略ではないだろうか?

また, 緊急事態宣言の解除においても, どのように段階的に解除するのか, についての議論もいろいろされているが, まずはコミュニティ内に閉じた動きから解除すべきであろう。そして, 本来もっとも摂取すべきアクティブな若年層において低い接種率となることが想像されることから, 飲食店への入店に際してのワクチン摂取証明といった, 入り口で制約を課す方法も有効かもしれない。

8. 関連研究動向

COVID-19 での感染者数についての研究は大きく統計に基づく分析・予測と, SIR モデルや PSO といった群知能型のモデルなどを基盤とするエージェントシミュレーションに基づくものに大別できる [Michal 2017][Veera 2020][Dinh 2020][Hilla 2020]。大量のデータでの統計処理が可能であることから, 比較的直近の予測であれが統計手法は有用であるが, 感染は人の移動で起こることから, 緊急事態宣言などの政策の効果を検証するには, 人の行動に着目したシミュレーションが必須である。ただし, SIR モデルなどを基盤とするものは散見されるが, 乗乗則に基づく行動モデルや感染ネットワークなどを複合的に組み合わせた感染モデルでのシミュレーション例は少ない。SIR モデルのみでは人の移動の仕方の影響までを考慮することはできない。

人の行動モデルに着目した研究としては大澤らの研究 [Osawa 2020] や倉橋らの研究 [Osawa 2020] がある。これら 2 つの研究はアプローチがそれぞれ異なるものの, ほぼ同じ結論に達しているところが興味深い。[Osawa 2020] では, 人をノードとしてスケールフリーネットワークでの感染ネットワークを構成し, 感染自体が移動するシミュレーションモデルを構築している。

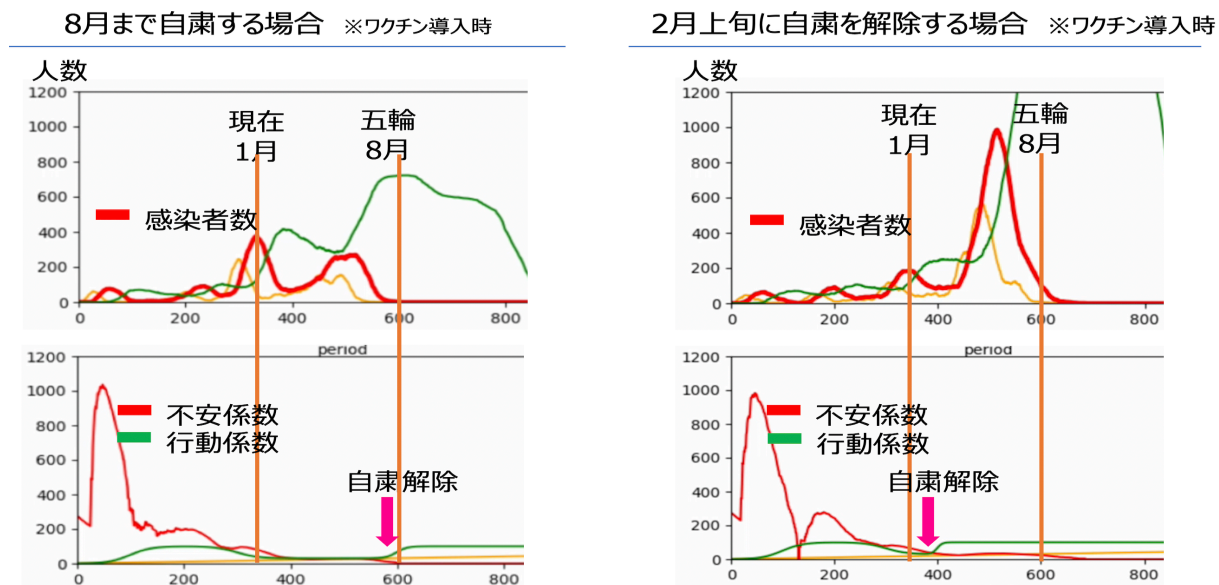


図 8: 緊急事態宣言解除のシナリオ

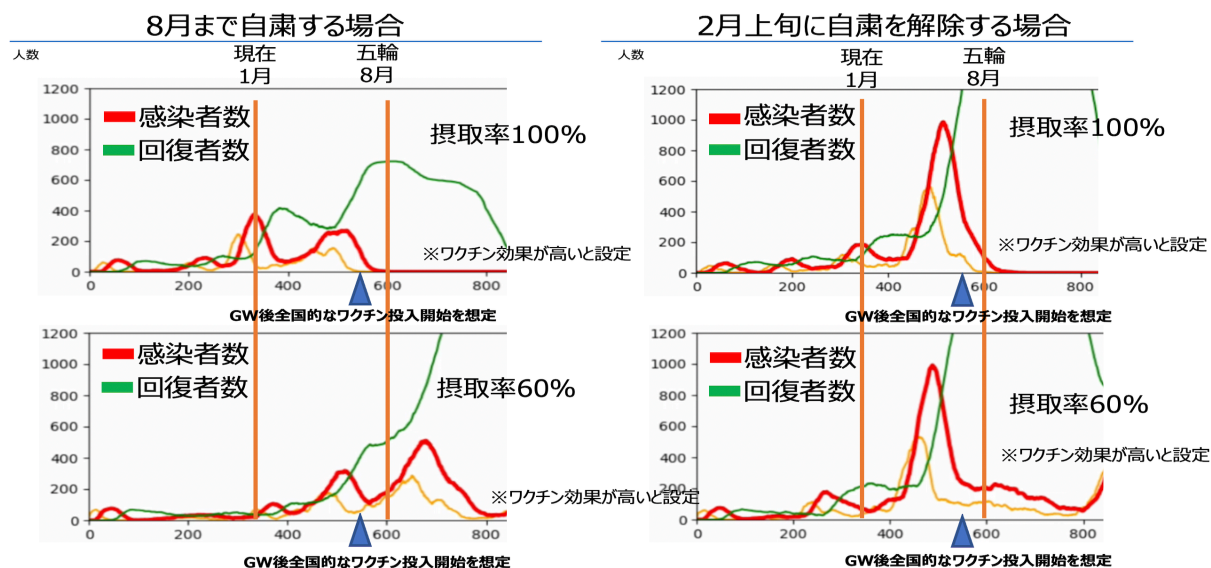


図 9: ワクチン接種率 70 %とした場合の感染拡散

これは著者らがデマの拡散モデルを提案した [ikeda 2018] と同じ方法であるが、結論として、コミュニティに閉じた行動が重要であるとして「Stay with your community」という提言をされている。

[ikeda 2018] 池田圭佑, 榊 剛史, 鳥海不二夫, 栗原 聡, 口コミに着目した情報拡散モデルの提案およびデマ情報拡散抑制手法の検証, 情報処理学会論文誌 (数理モデルかと応用), Vol. 11, No. 2, pp. 21-36, 2018.

9. まとめ

COVID-19 の感染拡散を, Twitter や報道番組の内容の変化の仕方から着想を得た乗継則に基づく人の行動モデルを考え, さらに, 感染ネットワークをスモールワールド型として構築した感染シミュレーション方式を提案した. 実際にこれまでの感染の再現が可能であることを確認し, 今後の懸案である緊急自体宣言解除のタイミングやワクチン接種戦略について考察した. 今回実装したシミュレーション環境では総エージェント数は1200と少ないことから, 現在, 総エージェント数1万程度のシミュレーターとして改造中であり, そのシミュレーターにて, より詳細な緊急事態宣言の段階的解除の仕方について, そしてワクチン接種戦略について分析を行う計画である.

謝辞

本研究は, 内閣官房 COVID-19 AI・シミュレーションプロジェクトの助成を受けたものである.

参考文献

- [Kermack 1927] W. O. Kermack and A. G. McKendrick (1927). “A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics”. Proc. Roy. Soc. of London. Series A, Vol. 115, No. 772, pp. 700-721, 1927.
- [Michal 2017] Michal Ptaszynski, Pawel Dybala, Rafal Rzepka, Kenji Araki, and Fumito Masui. ML-Ask: Open Source Affect Analysis Software for Textual Input in Japanese. Journal of Open Research Software, Vol. 5, p. 16, 2017.
- [Veera 2020] M. Veera Krishna, Mathematical modelling on diffusion and control of COVID-19, Infectious Disease Modelling 5, pp. 588-597, 2020.
- [Dinh 2020] Ly Dinh, and Nikolaus Parulian, COVID-19 pandemic and information diffusion analysis on Twitter, 83rd Annual Meeting of the Association for Information Science & Technology October, pp. 25-29, 2020.
- [Hilla 2020] Hilla De-Leon, and Francesco Pederiva, Particle modeling of the spreading of coronavirus disease (COVID-19), Phys. Fluids, Vol. 32, No. 087113, pp. 1-8, 2020.
- [Osawa 2020] Yukio Ohsawa, and Masaharu Tsubokura, Stay with your community: Bridges between clusters trigger expansion of COVID-19, PLOS ONE, Vol. 15, No. 12, e0242766, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242766>, 2020.
- [Kurahashi 2019] 倉橋節也, 新型コロナウイルス (COVID-19) における感染予防策の推定, 人工知能学会論文誌, Vol. 35, No. 3, pp. 1-8, 2019.