

新型コロナウイルスの感染は どうやって終息するのか(まとめ)

柴田晋平*

2020年5月14日 ver.2.0

要旨 特効薬やワクチンなどがない状態でどうして新型コロナウイルスの感染拡大が終息可能なのだろうか？という素朴な疑問についての考察結果を紹介します。

感染率(=一人が何人にうつすか)(専門用語では実効再生産数, Basic reproduction number)(文字 r で表すことにします)が、1より小さければ終息することが説明されています。

感染を再現するコンピューターシミュレーションを実施して定量的な結果を得ました。これまでの経過としては2020年3月ころには感染率はおよそ $r = 2$ で指数関数的感染拡大が起こっていましたが、4月16日緊急事態宣言以降 $r = 0.74$ 程度(接触65%削減)に下がり、大型連休中 $r = 0.4$ (接触80%削減)近くまで下がっています。経済活動の再開とともに r が増加すると思われますが、4月中旬の水準 $r = 0.74$ (接触65%削減)程度であれば、終息(実際に感染している人の数が十人レベル以下になるの)は9月末と予想されます。海外などからの感染者の侵入があっても、 $r = 0.74$ 程度の生活ができていれば、大きな山がまたやってくることはありません。逆に、海外からの侵入がなくても r が1を越えれば感染の山が再びやってきます。感染率 r が1以下に維持できる社会生活・日常生活をいかに実現できるかが今後の課題であることを示しています。県別の発症数に関しては、地域によって大きな感染率の違いを指摘することはできませんでした。地域差は人口密度の差として理解できます。最後に、論理的・定量的に理解して対応するためには科学教育の基盤が重要であることを指摘しています。

*山形大学名誉教授、宇宙物理学。shibata.shimpei@gmail.com

はじめに

特効薬もワクチンもない新型コロナウイルス感染がどうやって終息できるのだろうか？(原理的に無理？) という素朴な疑問について考えたことをまとめます。レポートはこれが3回目で、第1回目(3月21日発表)で人にうつさないことで終息することがわかり、第2回目(4月4日発表)では終息には二種類あることを示しました。また、コンピュータシミュレーションの有効性が示されました。今回の報告では、これまでの結果をまとめたあと、(1)シミュレーションが教えてくれることは何かを整理し、(2)地理的な広がりも含めたシミュレーションの結果を示します。最後に、将来への展望を書きます。

結論のみを知りたい方は、4節「まとめと議論」を参照ください。

1 きっかけ

本稿のきっかけは2020年2月末、新型コロナウイルスによる感染がみるみるうちに拡大するのを見て、

特効薬もなく、どうしてウイルスの感染が終息することが
あろうか？

しかし、かつてのいろいろな感染症はなぜか終息している。ど
うして終息したのだろう。

という疑問でした。

5分くらいあれこれ考えて、こう理解しました。

一人が二人に病気をうつし、それぞれがまた二人にうつし、、、とやっていくと、1回目で一人が二人になり、2回目で $2 \times 2 = 2^2 = 4$ で四人になり、3回目で $4 \times 2 = 2^3 = 8$ で八人、... と鼠算式に感染が広がります。このように、1より大きな数、今の場合は2を何回も掛け算すると、どんどん数が増えていきます。しかし、1より小さい数を掛けていくと、逆に、どんどん減少し、ゼロに近づきます。たとえば、一人が0.5人にうつす場合(確率的に考えて、一人の感染者が一人にうつしたとしても、もう一人の感染者は誰にもうつさなかった時、平均値は0.5人と考えます)、1回目は0.5で、2回目で、 $0.5 \times 0.5 = 0.5^2 = 0.25$ 、つぎは、 $0.25 \times 0.5 = 0.5^3 = 0.125$ 、その次は、 $0.5^4 = 0.0625$ という具合に減って、

ゼロに限りなく近づきます。つまり、**一人がうつす人数を 1 より小さくすれば必ず感染者数はゼロに収束する**ということがわかります。

(数学的記述の方が理解しやすい方のコーナー) 数式で書くと、一人の感染者が何人にうつすことができるか、という数字を r としたとき、

$$r > 1 \text{ なら} : \lim_{n \rightarrow \infty} r^n = \infty \quad (1)$$

$$r < 1 \text{ なら} : \lim_{n \rightarrow \infty} r^n = 0 \quad (2)$$

ということです。

感染のサイクル数 n は結局は時間の経過ですので、 d 日が一つのサイクルとすると (これまで約二週間と言われててきました) 経過時間 (日数) が t であれば、 $n = t/d$ となりますので、一人の感染者が何人に膨らむかは、感染者の合計を N として

$$N(t) = r^{t/d} \quad (3)$$

と表せます。このようなとき、 N は t の指数関数になっているといえます。

感染した人は自己免疫力で自力回復するので、極端な話、罹った人が誰にもうつさず、自力で回復すればそれで終息です (ウイルスはいなくなります)。実際は、残酷ではありますが、自己免疫力が足らないと死に至ります。つまり、ここでは、人が死ぬかウイルスが死ぬかの一騎打ちをしているわけで、一人の体内で免疫力でウイルスが死に絶えるか、感染した人が死んだために宿主を失ったウイルスが死ぬかということになり、感染者が他の人にうつさなければ、結局はウイルスは消滅します。

ここまでではっきりしたことは、一人の人が何人にうつすかという数字がキーであることです。専門用語としては、実効再生産数 (*Basic reproduction number*) というそうですが、一般には普及しそうにないので、以下では簡単に**感染率 (=一人が何人にうつすか)** ということにします。文字としては以下では r を使います。

— [まとめ] —

わかったことは、

とにかく人が人にうつさなければ必ず終息する

ということです。感染が始まった1月に「薬がなくても、とにかく人が人にうつさなければ必ず終息する」という基本原理をだれも大きな声で言いませんでした。感染の専門家にとっては常識のはずなのですが。「手洗いを確実にしましょう」などという前にこの原理的なことを標語として言てほしかったです¹。

2 コンピュータシミュレーション

原理はわかりましたが本当にそうなのか？数量的に確証がほしいと思ったので、コンピュータシミュレーションをしてみました。

私は天文学者ですが、宇宙の化学進化の計算というのがあって、その計算とウイルス感染の計算が非常に似ています。宇宙誕生時は、元素は水素とヘリウムばかりだったのですが、星が誕生すると、星の中では、炭素・酸素・窒素のような生物の骨組みをつくる元素や鉄などの金属元素が作られ、それらの元素が、しばらくの潜伏期間をおいて、宇宙空間にばらまかれ広がっていきます。星が次々に誕生して世代を重ねるので、そのプロセスを追うわけです。この分野の最近の話題としては、金という元素の起源の理解が進んだことがあげられます。中性子星と中性子星の合体が重力波の観測で確認でき、このとき金が作られるようなのですが、中性子星と中性子星の連星が合体までに数億年がかかる、つまりこれが“潜伏期間”で、このことと考えると宇宙の中での金の分布がうまく説明できるのです。

ともかくも、この類似性のおかげで、気軽にコンピュータシミュレーションをやってみようという気持ちになりました。(疫学には全くの素人なのにも関わらず！) 詳しい計算方法は別の報告で紹介しますが、大雑把にいうと、1億人ほどの人口に相当する記憶領域を準備して、最初は全てに「健康」ということを記憶させ、その後、与えられた確率で誰かが感染した、つぎに、その人が誰かにうつしたというように、記憶内容を順次書き換えて変化を追っていくようなものです。

図1は今日までの計算結果です。

図の読み方を説明します。横軸は最初のウイルスの日本への持ち込み

¹感染率 r が1以下であれば収束するということがマスコミにはっきり書かれたのは私が知る限りでは5月に入ってからでした。 $r=2.2$ くらいを予測しているとインタビューに答えた専門家が1月末にいましたが、そのとき、 r の意味が何を意味するかをもっと丁寧に説明がしていればとおもいます。(専門家、がんばれ！)

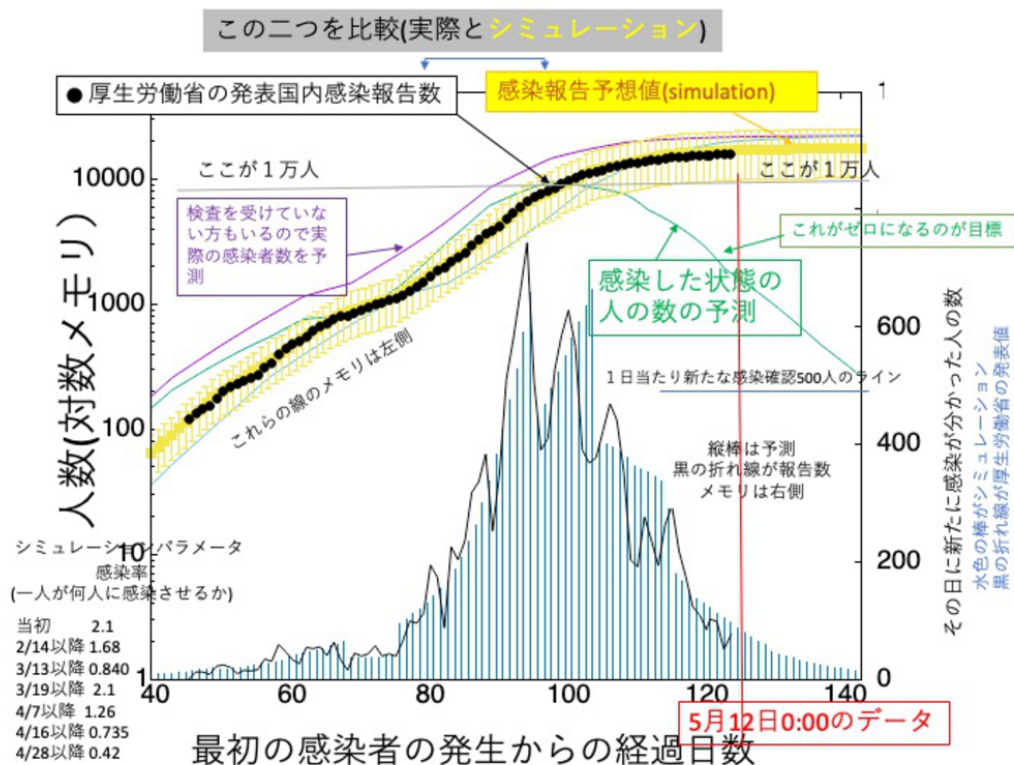


図 1: コンピュータシミュレーションによる感染拡大予想と実際の推移

からの日数です²。黒い丸はこれまで感染が確認された総数です (厚生労働省のホームページに毎日のデータとして公開されているもの)。目盛りは左側の縦軸で読み取ってください。対数目盛りといって、一、十、百、千、万、というように桁が増えていく目盛りです。黒の折れ線は、その日に新たに感染が確認された人数で、メモリは右側で読み取ってください。

次に計算結果ですが、まず黄色いマークが感染が確認された総数です。縦に誤差棒といって不確実性を示しています。黒い丸とこの黄色いマークとが一致していれば、現実世界とコンピュータシミュレーションが一致していることを意味しています。黒の折れ線に対応する計算結果は青の縦棒で表されています。黒の折れ線と青の縦棒があていば、現実世界とコンピュータシミュレーションが一致していることを意味してい

²今回の計算ではクルーズ船は除外して国内の感染のみを計算しています。ただし、クルーズ船の乗客が下船し、地元に戻ってから感染が確認されたものは国内への侵入として勘定しています。

ます。

実際に感染しても無症状であったり、検査して欲しくてもしてもらえなかった人もいることから、コンピュータシミュレーションでは検査が行われる確率を仮定しています。そのために、発表された感染者数(黄色いグラフ)ではなく、把握されていない感染者を含めた本当の感染者数を予測しています。それが紫のグラフです。すでに回復して免疫を持つに至った人は、ウイルスが駆除されているので人にうつすことはないと考えられます。一方、まだ回復しておらず現在生きたウイルスを保持していて人に感染させる可能性のある人の人数を緑のグラフで示しています。この数(緑のグラフ)が0になれば終息ということになります。

実際に計算してみると感染率 r で感染拡大か縮小かが決定されることが確認されるだけでなく、少し細かいことがわかりました。いくつか箇条書きにまとめてみます。

1. 2-3月の感染率はおおよそ $r = 1.5 \sim 2.0$ で感染者が増加していました。緊急事態宣言の4月7日以降は $r = 0.74$ 程度に、連休前に $r = 0.42$ までに抑制され現在(5月13日)に至っています。
2. 今回の計算を始めたのが3月7日でしたが、春分の日前後から抑制が効かなくなりました。厚生労働省の発表と私の計算がずれ始め、感染率が $r = 2.1$ まで増加して非常に危険な状態だいう結論に私が至ったのは3月26日でした。私のホームページでは3月30日には、このまま行けば5月1日に感染者数2万人で、医療機関が対応できないほどの新たな感染者数になることを予想しました。
3. 感染してから症状が現れて検査結果が陽性と判明するまで要する時間も考慮してシミュレーションは行われています。そのために、 r の変化から陽性報告数がずれたり波状になるようすも再現されています(図1)。緊急事態宣言が出てから5日目くらいにはその効果がどの程度なのかが予想可能でした。人との接触の抑制は、大都市への緊急事態宣言が出た直後で35%抑制、緊急事態を全国に拡大したあとでは80%抑制でした。
4. 終息までの時間も予測可能になりました。現状のままの抑制レベルであれば、感染した状態の人の数が10人以下になるのは6月末の見込みです。ただし、現在ほどの強い抑制 $r = 0.42$ を維持するのは経済生活や学校のことも考えると難しいと思われますので、4月中

旬の $r = 0.74$ (65%抑制) にまで戻したとすると、感染した状態の人の数が10人以下になるのは9月末になる見通しです。

5. 今後、新たな感染者が海外などから一定の割合で侵入した場合も計算してみましたが、 $r = 0.7$ ほどであれば感染の再燃は起こりません。しかし、逆に外部からの侵入がなくても、抑制が緩んで r が1以上になればまたたく間に再燃します。感染率 r が1以下の社会をどう作っているかに全てがかかっていることがわかります。

— まとめ —

コンピュータシミュレーションをすることで、状況の数値化が可能になり、現在の感染率 r の値や将来の予測が可能になりました。

感染状況をまとめると、4月上旬では感染率は $r = 2$ 程度で非常に危険な状態であり、緊急事態宣言以降 r は減少し、5月12日現在 $r = 0.42$ になっています。このままの強い抑制は続けられませんが、たとえば今後 $r = 0.735$ (35%抑制、コロナ以前の65%) であれば、終息は9月末になります。

— 議論 —

注意喚起を訴えていた4月ころ、「感染爆発になるかどうかの瀬戸際にいます」や「重大な局面にいます」といった感情的な訴えが多く伝えられましたが、数量的な説明が欠落していました。

数量的な表現があった方が説得力があったと思います。漠然と「瀬戸際です」というよりは、「感染率(一人が何人にうつすかの人数)は現在およそ2です。これを1以下にしないと収束しません」あるいは、さらに情報量をすやして、「現在の感染率2のままだと、4月末に感染者数2万人、1日あたりの新しい感染者は二千人をこえるので医療現場が対応できなくなります。」などという表現が可能です。

これらの数字を受け止めるためには、国の科学教育がしっかりしている必要があります。このことも今回試されていると思います。

3 終息にふた通りあり

収束せずいわゆる感染爆発になったら最後はどうなるのでしょうか。

シミュレーションを作り始めた頃のエピソードです。コンピュータ上に日本の人口1.26億人を配置するのは今のコンピュータは高性能といって

も計算時間がかかりすぎますので、最初、人口 10 万人でプログラムを作り、プログラムミスがないかチェック作業をしてました。やっていると、感染率 $r = 2$ なのに、4 ヶ月ほどで終息する結果が出ました。図 2 上です。プログラムミスかと思い原因を調べてみると、ウイルスをうつそうとした時にうつす相手がすでに免疫をもっていてうつらないという現象が起きていました。

ここでも理屈は簡単です。感染率が 2 として、一人の人が二人にうつすのですが、二人のうちの一人がすでに免疫を持っているとすると、一人にしかうつせません。事実上の感染率が 1 になってしまうわけです。なので、人口の半分以上が感染して免疫抗体をもってしまうと、実質的な感染率が真の値の半分になり、これが 1 より小さくなれば終息に向かうのです。

以上の結果から感染症の終息には二つのパターンがあることがわかります。

抑止終息 感染対策によって感染率 r を 1 より小さくすることで感染を抑止することができた場合。

飽和終息 感染率が 1 より大きいものだけれど、全人口の多くが感染し免疫を持ってしまった場合。

という二つです。

抑止終息に成功すれば非常に小さな被害ですみます。ただし、このばあい、感染率が増加して 1 以上になれば、再流行が起こり得ます。日常的な感染対策をしながら感染者を抑え、薬やワクチンの開発を待つことになります。

飽和収束の場合ですが、どうせみんな感染するのだから対策しなくてもよいのでは？ 想う人もいるかもしれませんがそうではありません。特に、今回のように重症化率・死亡率が高い場合はこの考えでは大量の死者や医療崩壊を招きます。

試しに、少し抑制が効いて、 $r = 1.5$ で飽和終息した場合の計算結果、図 2 の二つの結果とを比べてみましょう。感染を防止して $r = 1.5$ にすることで、終息するまでの総感染者数を 6 万人に減らすことができています (25 % 減)。死亡者数もそれだけ減少します。しかもピーク時の感染者数が、3 万人から 1 万人に減少しています。また、ピークがやって来る時期は、 $r = 1.5$ であれば $r = 2$ に比べて 50 日も遅れます。これらは、治療に必要な病床数、医療スタッフの数を大きく左右します。できるだけ r

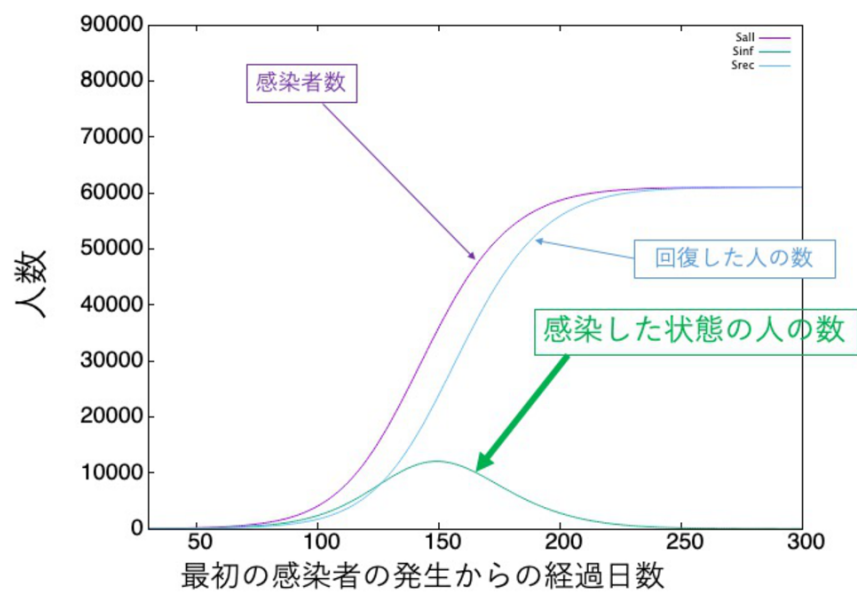
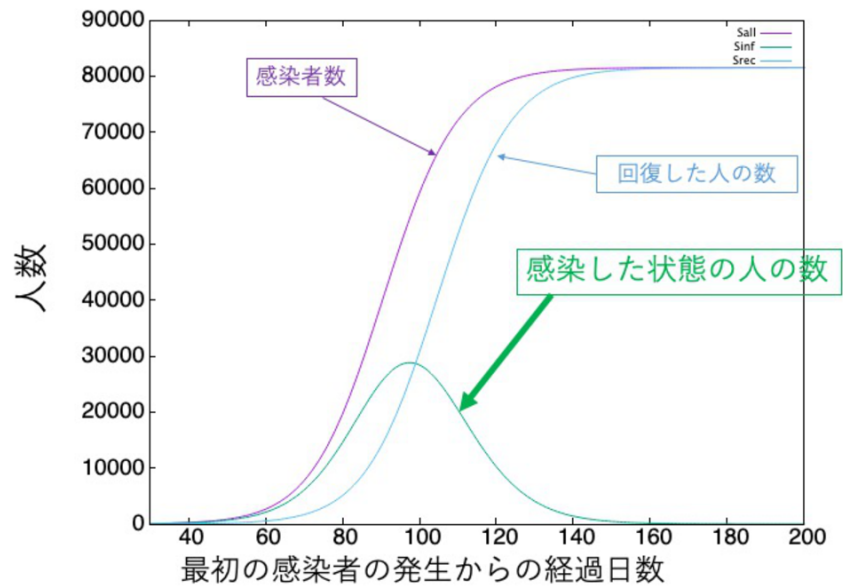


図 2: (左):人口 10 万人で $r = 2$ の場合の計算。5 万人が感染したところで、増加が鈍り始め、8 万人が感染したところで終息する。(右): $r = 1.5$ の場合の計算。約 3.3 万人が感染したところで、増加が鈍り始め、6 万人が感染したところで終息する

を小さくして、ピーク時の感染者数を抑える遅くすることができるかどうか非常に重要になります。何れにせよ、10万人中の感染者数が1万とか2万ということですのでとても悲惨な状況です。

— まとめ —

感染終息には二つのパターンがあり、そのひとつは感染率が1より小さくなるように対策ができた場合で、もう一つはそれができず人口の過半数が感染してしまい飽和状態になって終息する場合です。後者であっても、感染率を少しでも抑えることで、最終的な感染者数を減らし、ピーク時の1日あたりの新たな感染者数を減らし、ピークの時期を減らすことができます。

— 議論 —

感染症の専門家は私よりもっと精度の良いシミュレーション結果を持っているはずです。定量的な数字や図示をふんだんに取り入れた説明が可能であったとおもいます。日本では、感染の増減を示す図などで説明がされるようになったのは連休直前だったとおもいます。一方、3月18日のドイツ首相のメルケルさんの演説の中では、自由の抑制の目的は「時間を稼ぐこと」であることがすでに明確に述べられています。

3.1 地域差

これまでのシミュレーションは一つの地域(日本という一つの国)を扱ってきました。ワンゾーンモデル(one-zone model)とよびます。しかし、実際は地域の広がりがあり、人口密度も異なり、都市間の交流もあります。大都会と地方都市は別の感染拡大のスピードでしょうし、大都市の増加が地方都市に伝播する現象がおこります。そのような現象をシミュレーションできれば、私の住む山形の感染状況もきちっと把握できるかもしれません。

地理的拡散を含んだシミュレーション(以下、二次元モデル)では、平面内に日本の地形、人口の分布、交通ネットワークの状況、人の動きなどを考慮しなければいけません。しかしこれは一人で行う仕事とはとても思えません。人の動きをインプットしようと思えばビッグデータの助けも必要です。これは専門家がすでに行なっていると予想していますが、公開されていないのは残念です。

それで、簡易的なモデルで試すことにしました。具体的な方法は別に報告します(後日)。

まず、二次元モデルでは、山形で今後どうなるかを予想することはできないことがわかりました。しかし、人の動きに対する情報が少し得られましたのでそれをここでは報告します。

コンピュータシミュレーションでは、ある一人が誰に感染させるかといったことは確率であたえ、あとは、乱数を生成して計算をすすめます。サイコロを降って決めるのと同じです。そうすると、乱数によってたまたま不幸が続く場合と、ラッキーが続く場合がおこります。ちょっとした不幸は指数関数で増幅されるので、幸不幸の差がとて大きくになります。いま、10回のシミュレーションの結果を並べたものを図3に示します。平均したものが期待値として色分けして図に重ねています。統計的な広がりとして示されている幅は標準偏差 $\pm\sigma$ です。図をみてわかることは、同じ感染率を仮定しても、運が悪ければ1800人も感染者が出るのに、運が良いと180人で済むということがあるということです。

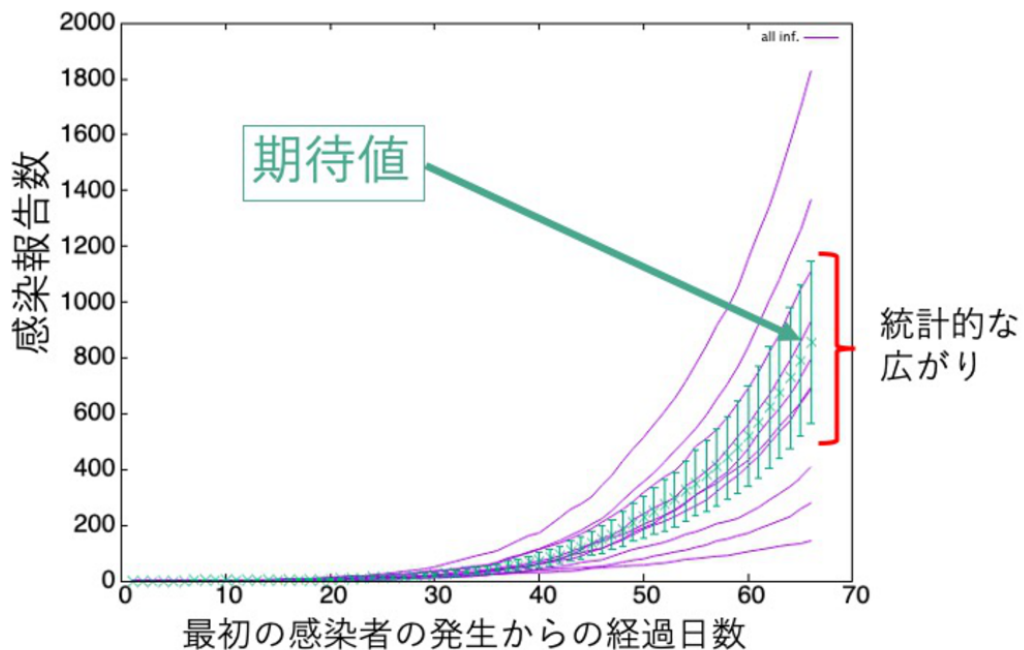


図 3: 異なる乱数を用いた時の感染者の違い

日本全体という大集団での現実の結果はおそらく計算上の期待値に近

いとおもわれますが、山形県の感染数ということになるとこのような偶然に支配されていることになります。たまたま、関東地方からお友達が来た時に感染したというような具体的なエピソードとして理解した方が感染数を理解しやすいわけです。東北各県の感染者数はそのような偶然の結果として理解するしかありません。東北地方の各県の感染者数の平均についてはシミュレーションと一致させることができます。しかし、宮城県が88、山形が69、岩手が0、秋田が16といった数字(2020年5月12日のデータ)の一つ一つを再現することはできません。したがって、山形県の感染者数がどうなるかの予測はできません。

一方で、人の行動について少し二次元モデルから推定することができました。今回の簡易の計算では、コンピュータ内部で地図を再現することはあきらめ、日本全体を $1600\text{km} \times 200\text{km}$ の長い長方形に近似します。人口密度は正しく現実を反映させて1.26億人を長方形の内部に分布させました(図4)。また、外部からの感染流入がどこで起こったかを厚生労働省発表の感染経路のレポートを見て、シミュレーションに組み込んでいます(例えば、1月6日に帰国者が神奈川県で、1月19日に中国からの来日者が東京で、、、といった外部からのウイルスの侵入のエピソードを二次感染が増えてくる2月上旬まで組み込みました)。感染率は全国で一律でワンゾーンモデルと同じにしています。

ワンゾーンモデルに対して新しく加わった要素は、一人ひとりの移動です。人口全体の $f\%$ が、出張・レジャーなどで長距離の移動をすること、それ以外のほとんどの人は日々の生活や仕事のために平均 D km 移動するとしました。東京都、大阪府、宮城県を取り上げて各都府県の感染者数を再現するように f と D を決定しました。結果わかったことは平均的な人々の活動する距離は $D = \text{約}8\text{km}$ であること、日常ではなく長距離を移動するひとは人口の $f = 3\%$ 程度であることでした。山形の人から見ると8kmはちょっと長いですが、都会の人口に重みがかかっているのです。このような値になります。実際の感染者の分布の二次元モデルの結果は図4のようになります。各地域の感染数はほぼ再現されています。地域によって感染率が著しく異なるというような仮定を導入する必要はありませんでした。

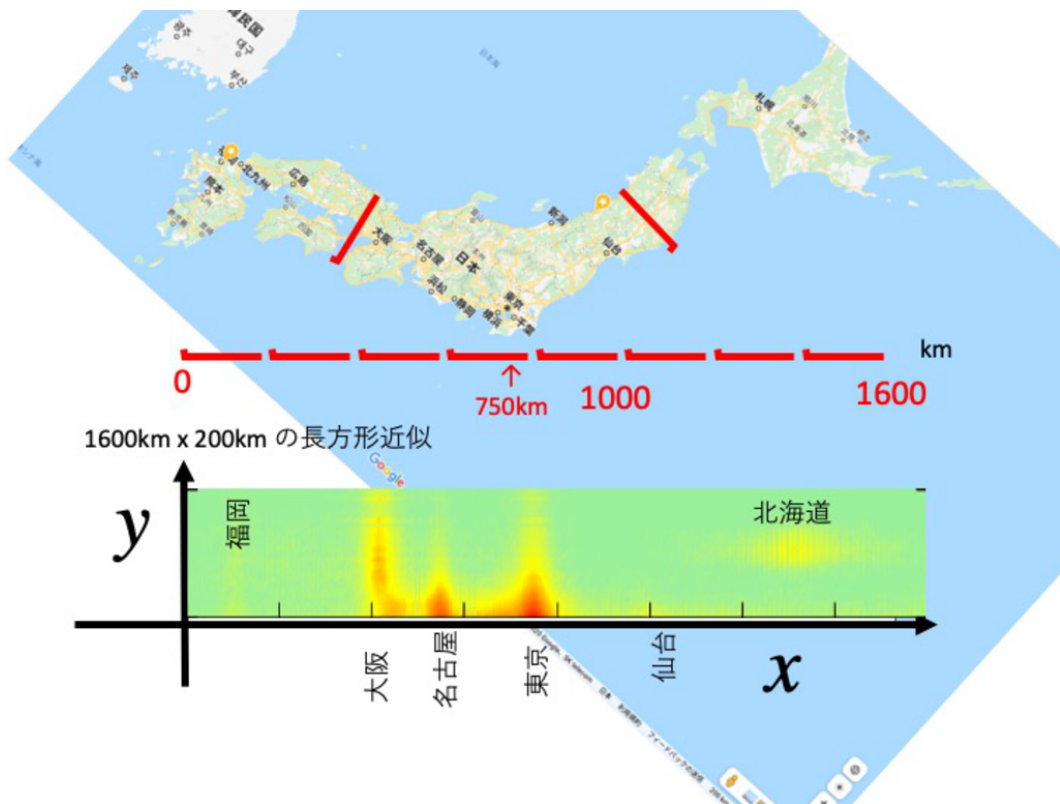


図 4: 二次元モデルの配置と感染者の分布。赤い色の部分が感染者が多い。

4 まとめと議論

特效薬やワクチンなどが無い自然の状態では感染症が拡大するか縮小するかは感染率(=一人が何人にうつすか) (専門用語では実効再生産数, Basic reproduction number) (文字 r で表すことにします) が 1 より大きいか小さいかで決まり、1 より小さければ終息します。これまでの経過としては 2020 年 3 月ころには感染率はおよそ $r = 2$ で指数関数的感染拡大が起っていましたが、4 月 16 日緊急事態宣言以降 $r = 0.74$ 程度 (接触 65%削減) に下がり、大型連休中 $r = 0.4$ (接触 80%削減) 近くまで下がっています。これらのことは非常に簡易的なコンピュータシミュレーションで解析が可能であることがわかりました。

シミュレーションは有効であり将来については次のことを示すことができました: (1) 経済活動の再開とともに r が増加すると思われますが、4 月中旬の水準 $r = 0.74$ (接触 65%削減) 程度であれば、終息 (実際に感染し

ている人の数が十人レベル以下)になるのは9月末と予想されます。(2) 海外などからの感染者の侵入があっても、 $r = 0.74$ 程度の生活ができていれば、大きな山がまたやってくることはありません。逆に、海外からの侵入がなくても r が1を越えれば途端に大きな感染の山が再びやってきます。(第二波という言い方がありますが、波は外からやってくるのではなくて、国内で起こるものです。) 今回のシミュレーションを続ければ、もし再燃があった場合、新たな感染数が200人/日を超えるような事態になる約20日前に予測が可能であることもわかりました。

以上のことは、**感染率 r が1以下に維持できる社会生活・日常生活をいかに実現できるか**が今後の課題であることを示しています。

課題は二つあります。一つはデータの信頼性について、十分にPCR検査が行われていないために、実際の感染者数の見積もりに自信が持てない点です。これに関しては、抗体の検査を無作為にさせていただき感染者数の割合がシミュレーションと一致するかをチェックする必要があります。

もう一つの課題は政府や専門家の市民への説明の方法です。「いまが瀬戸際です」といった感情的な表現がおこなわれることが多く、この報告でいくつか例示している数値的、客観的な表現を行うべきです。最後にもう一例加えると以下のような例があげられます。今日、5月14日に緊急事態宣言の一部解除がありましたが、「気を緩めると第二波がやってくるかもしれないので注意しましょう。」と表現されています。これに加えて次のことが言えます:「第二波というのは海外からの感染者の流入では起こりません。国内での感染率が1を超えた場合におこります。具体的には、感染拡大が起こる前の普通の生活と比べて人との接触の抑制が53%を割りこんだばあいに第二波がおこります。」

最後に、長期的な目標は、論理的で定量的な説明を受けとめることができる市民がたくさんいることだとおもいます。科学的に考える力をしっかり持った市民がたくさんいることが力になります。これは今回の感染症の問題だけでなく、今後人類が直面する多くの問題に共通しているともいますので、今後の課題としたいと思います。研究者の日頃のアプローチ活動、理科教育の推進は大事です。

参考資料

用いたデータはすべて厚生労働省ホームページ「新型コロナウイルス感染症について」の中の報道発表資料です。

<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/>

0000164708_00001.html#houdoutsuuchi

改訂履歴

2020.5.14 要旨があったほうが読みやすいということなので要旨をくわえました。さらに図を大きくしました。