

新型コロナウイルス感染は どうやって終息する？

柴田晋平

2020年3月21日, 訂正3月23日*

1 Preamble

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るのか？

かつてのいろいろな感染症は確かに終息している。どうやって終息するのだろう。

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 $2^2 = 4$ で四人になり、3回目で $2^3 = 8$ で八人、...と鼠算式に感染が広がります。このように、1以上の数、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以下の数を掛けていくとどんどんゼロに近づきます。たとえば、 $0.5 \times 0.5 = 0.25$ 、 $0.25 \times 0.25 = 0.0625$ 、 $0.0625 \times 0.0625 = 0.0039$ という具合です。

一人の感染者が何人にうつすことができるか、という**感染の因子**を r としたとき、数式で書くと、

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

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

*回復までの時間設定にバグがあったので修正した。違いはあまりないが。

つまり、一人がうつす人数を1以下にすれば終息するということになります。病気に罹った人は自己免疫力で自力回復するので、極端な話、誰にもうつさず、自力で回復すればそれで終息です。実際は、残酷ではありますが、自己免疫力が足りないと死に至りますので、結局、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す。感染者が他の人にうつさなければ、ウイルスは結局は死に絶えることとなります。

感染が広がっている中、

とにかく人が人にうつさなければ必ず終息する

という原理をだれもはつきりと言わないのは良くないと思いました。みんながわかっているならばそれに集中できるからです。感染が拡大せずにすんだ基本の「き」はこのことだったと思います。

2 シミュレーション

わかったことを数量的に確認したいと思いました。私は天文学者ですが、感染のシミュレーションは宇宙の化学進化の計算にとってもよく似ています。

宇宙を構成する原子の種類は宇宙が誕生した時、水素とヘリウムだけでした。(すこし、リチウムとかもありましたが。) 私たちの体を作っている炭素、酸素、窒素や文明で利用している多くの金属元素などは宇宙には存在しませんでした。宇宙の最初にできた星は水素とヘリウムだけからできた星でした。星の中心では核融合反応が起こって、そのエネルギーで星は光ります。星の中心では炭素、酸素、窒素などのいろいろな元素が合成されます。ウイルスを持っている人と似ています。ウイルスが増殖するように水素とヘリウム以外の元素が星の中で増殖します。

星は一生の最後に超新星爆発をおこし、核融合したさまざまな元素を宇宙空間にばら撒きます。ウイルスの拡散と似ていますね。そして次に誕生する星は水素とヘリウム以外のいろいろな混ぜ物の元素を含んでいます。この星もさらに核融合を行い、最後に爆発し、また元素をばら撒きます。このようにして宇宙を構成する元素は水素とヘリウム以外の様々な元素で汚染されていきます。星が誕生してから超新星爆発をするまでには時間がかかり、これはちょうどウイルスの潜伏期間があるようなものです。この潜伏期間は星の質量に応じて100万年から100億年の幅をもっています。また、星の種類や爆発の仕方にもいろいろあって、ば

ら撒かれる元素の種類も異なります。このようなプロセスを宇宙誕生から現在までコンピュータシミュレーションすることで、現在の私たちの周りにある物質がなぜこのような元素組成になっているかを調べることができます。こういった仕組みで地上にある元素ができたかは現在ではほぼ理解できています。

このように宇宙の元素組成の時間変化を調べることを宇宙の化学進化の計算といいます。こういった問題に天文学者は慣れていまして、疫学的な計算もだいたい想像がつきます。感染者がいつ、どれくらいの数入国し、どのような方法で感染させ、それがまたつぎの感染をおこし、、、というプロセスをコンピュータの中でシミュレーションします。現実のデータを比較すると、感染の因子 r の値がわかってきます。クラスター感染などが話題になっていますが、クラスター感染する割合などもわかります。クラスターを防ぐとどれくらいの速さで終息に向かうかも計算できます。この次の節ですこし実際のシミュレーションを見てみましょう。このような計算には不定性がかなりあることも理解していますが、そのようなことも含めて、こうすればこのくらいの感染が防げるといった予測は疫学の研究者は持っているはずですが、これをなかなか発表してくれません。「今が拡大か終息かの正念場だ」という感覚的な表現が使われるばかりで、論理的な説明が行われていません。初めて予想カーブをマスコミに流したのは3月に入ってからだったと思いますが、このときも「今が拡大か終息かの正念場だ」という感覚的な印象を伝えるだけにした使われませんでした。実際はもっと具体的な説明を専門家はできるはずなのです。これはとても残念なことでした。

3 結果と考察

私が行ったごく簡単なシミュレーションの結果でいまの感染状況を説明します。

プログラムは簡単です。最初のプログラムは2時間ほどで作れました。以下のような計算です：

- 1月14日から1月19日にかけて日本にウイルスを持ち込んだ事例が5件ありました(厚生労働省のホームページ)ので、これが種となって感染が広がったとします。
- 感染の因子 r とウイルスをもって感染する能力を何日間保持できる

かという日数 d をきめると、ウイルスを持った人がある日に人にうつす確率が計算できますので、あとは乱数を降って、その確率にしたがって、つぎつぎに感染者を コンピュータの中で増やしていきます。

- 実際の感染者に対して症状があっても検査をしてもらえるかどうかはわかりません。感染者が検査を受けることができる割合を h とします。これで陽性が判明する人の数が計算されますので、厚生労働省の患者数の報道を比較して、シミュレーションが正しいか検証します。

以上がシミュレーションの仕組みです。

厚生労働省の発表データに合わせることは次のようにパラメータを選べばできることがわかりました：

感染の因子	$r = 2.1$	基準値
	$r = 1.5$	2月24日以降強い注意喚起があり 25%改善 (図1)
	$r = 0.882$	3/13からの強い抑制後 (図3)
	$r = 1.155$	3/13からの強い抑制後 (図5)
感染できるに数	$d = 14$ 日	
検査の実施割合	70%	検査してもらえない例が多くあったため
	80%	3月8日以降

たったこれだけの仮定で図1のようにシミュレーション結果がでできます。そして、実際の患者数を再現しています。¹比較していただきたいのはコンピュータシミュレーションで検査して感染者として判定された人数(黄色)と厚生労働省の発表の患者数(黒い○)です。

細かいことですが、乱数を降って感染を偶然の確率に任せているので、シミュレーションは800回行い平均値を求めてグラフにしています。黄色いグラフには標準偏差で誤差棒をつけています。

グラフをみると3月16日以降、やや感染者数の増加が抑えられているようにも見えます。患者数の増加は基本的に指数関数的ですので、縦軸を対数にするのが科学的なアプローチと言えます。それで対数表示にしたものを図2に示します。最近の3日間のグラフの傾きは決して緩やかになっていませんので、感染の因子が小さくなったかどうかは微妙なところです。

とはいっても、図1の計算は感染の因子 r は一定値ですがみなさんの努力が全く効果がないということはないでしょうから r は当初よりは減少

¹当初の専門家の意見は $r = 2.2$ でした。

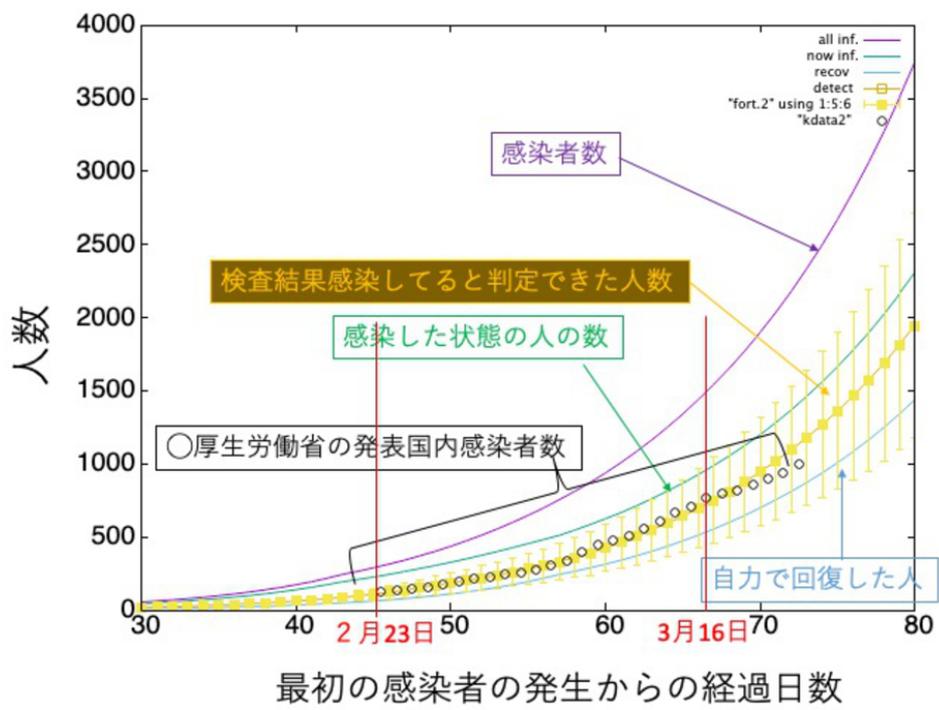


図 1: コンピュータシミュレーションによる完成拡大予想と実際の推移

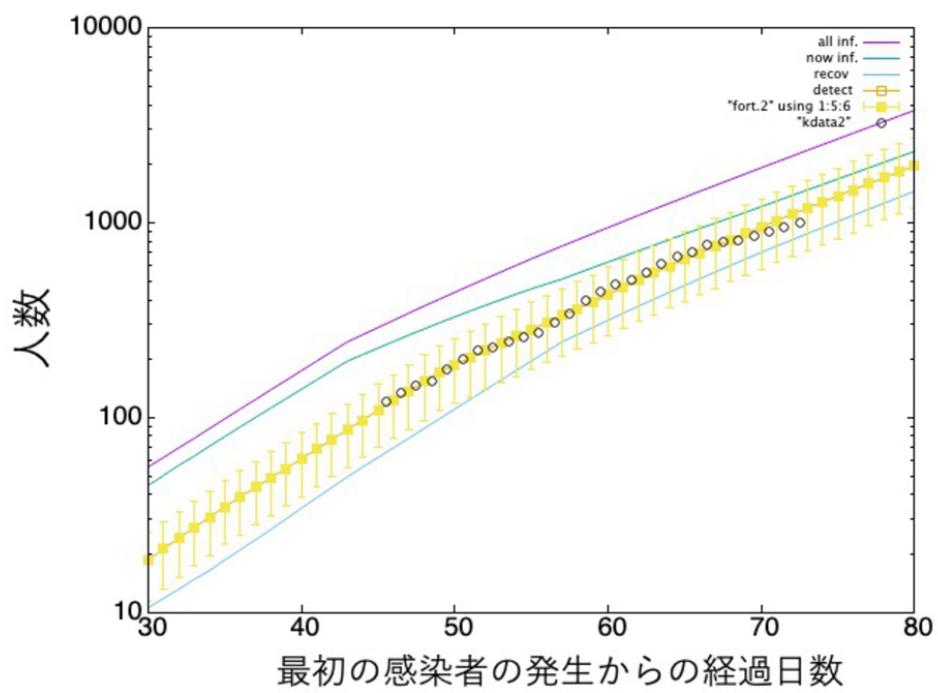


図 2: 図 1 を縦軸を対数で示したもの。

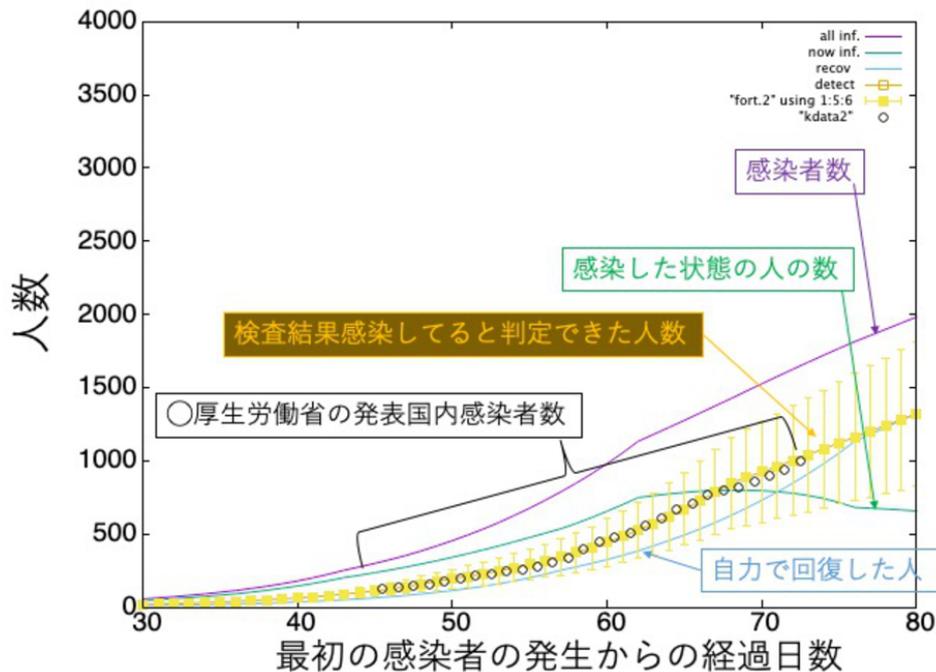


図 3: 3月13日以降 $r = 0.882$ にできたと仮定した場合。

していると考えたいですね。そこで、3月13日の集会、イベント、あるいは学校行事などの中止の要請で感染の因子 r はある程度減少させることに成功していると考えられるべきとおもいます。そこで、3月14日以降 r が減少したとしてどれくらい減少したとすると良いかをシミュレーションはしてみました。すると、2.1 だった感染の因子が4割の $r = 0.882$ になったとして計算してみる良いように見えます。これが図3です。これが正しければ、 $r < 1$ ですから今の努力を続ければ終息に向かうことができるはずという結論になります。

この値はちょっと楽観的すぎる r の値でないかと思いますが、この場合終息にどれくらいの時間がかかるかというのも予想できます。計算を800日まで進めると、図4のようになります。終息は楽観的にみても7月末以降になります。

あらためて図3を見ると、厚生労働省のここ3日の感染者数の増加率(傾き)は $r = 0.84$ の時の傾きよりも急です。この点を考慮すると、3月

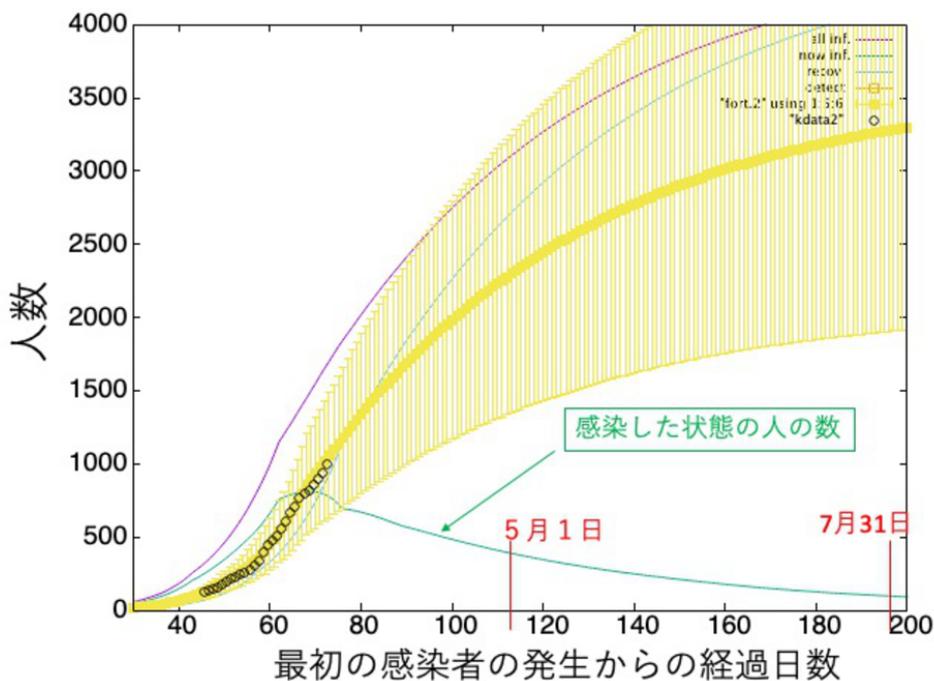


図 4: 3月13日以降 $r = 0.84$ にできたと仮定した場合の予想。

14日以降は $r = 1.155$ 程度の方が傾きがよく再現できることがシミュレーションからわかって、もし $r = 1.155$ の場合で予測すると、図5のようになります。これは、今日までのデータと矛盾しないですが、終息せず、7月末に感染者数の累計は3万人を超えます。つまり**今日3月21日現在、 $r = 1.2$ から $r = 0.8$ あたりの非常に微妙なところで遷移していて、うまくすれば夏に終息、うまくなければ一年以上かかりそう**ということになります。このくらい長期になると治療薬などが出て死亡率は下げることができるかもしれません。

研究者は、今が瀬戸際というのを数値を示してあげると説得力が出て、「瀬戸際って言ったってどう瀬戸際なのかわからない」という市民の声に答えてあげるのがいいと思います。専門家は私が片手間にやった以上に精密なシミュレーションをやっていて、いろんなことを掴んでると思います。

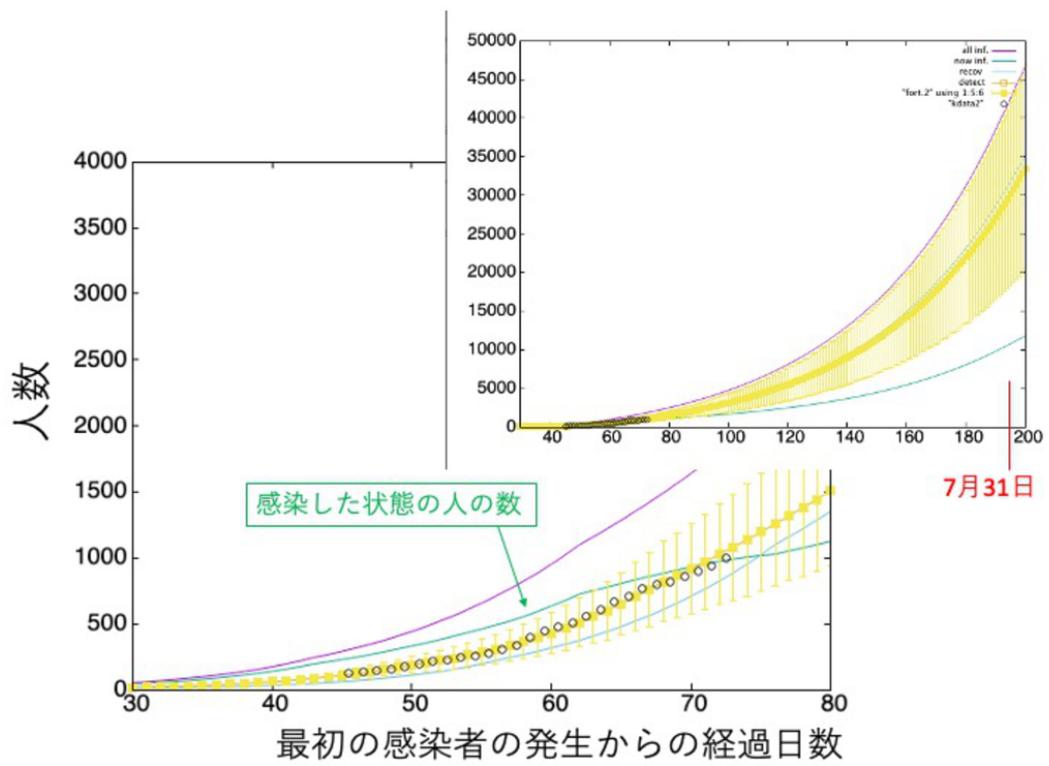


図 5: 3月13日以降 $r = 1.155$ だったと仮定した場合の予想。