

新型コロナウイルスの感染は どうやって終息するの？(その2)

柴田晋平

2020年4月4日

Preamble

「新型コロナウイルス感染はどうやって終息する?」という素朴な疑問について考えたことを報告(3月21日に掲載¹)としてまとめました。そこで、感染の終息の原理となる考えを示しました。その後、もう一つ基本的なことがあることに気がつきました。指数関数的増加(マスコミなどでは感染爆発[over shoot]という言葉が使われているようです)についてです。

この報告では、§1と§2で先の報告のエッセンスを繰り返して、つぎに、§3と§4で追加の基本事項を加えています。これは、単なる自然の法則に対する理解を超えて、今後の予測や対策に役立つ内容にしました。

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？

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
終息したのだろう。

¹<https://www.shibatashinpei.jp/>

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、逆に、どんどん減少し、ゼロに近づきます。たとえば、 $0.5 \times 0.5 = 0.5^2 = 0.25$ 、つぎは、 $0.25^3 = 0.125$ 、その次は、 $0.25^4 = 0.0625$ という具合です。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。**

(数学的理解の方が考えやすい人のコーナー) 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**感染の因子**を r としたとき、

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

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

ということです。

ステップ数 n は結局は時間の経過ですので d 日が一つのステップに要する時間とすると経過時間(日数)と t とすると $n = t/d$ となりますので、上の式は

$$\text{感染者数 } N(t) = r^{t/d} \quad (3)$$

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。

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、かか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。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、宿った人の免疫力でウイルスが死に絶えるか、宿った人が死ぬためにウイルスも死ぬかということになり、結局はウイルス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のに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

一人がうつす人数を1以下にすれば終息する、ということがわかったわけですが、それ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、感染のコンピュータ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て、それほど難しい計算ではないように見えます。

以下、§ 2.1 は計算方法、§ 2.2 は結果です。結果だけ知りたい人は計算方法を読み飛ばしても結構です。

2.1 計算方法

プログラムは簡単です。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 r/d と計算できますので、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告と比較して、シミュレーションが現実をシミュレートしているか検証します。

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²
 $r = 1.5$ 2月24日以降強い注意喚起があり25%改善(図1)

²新型コロナウイルスが中国で発生した直後のラジオにおける専門家へのインタビューで専門家が想定している値として $r = 2.2$ が紹介されていたことに依っています。通常のインフルエンザでは、 $r = 2.4$ 程度だと言っていました。

- 感染できる日数

$d = 14$ 日

- 検査の実施割合 70% 初期 検査してもらえない例が多くあったため 80% 3月8日以降保険適用で改善

シミュレーションではその日に感染した人の数、感染を経験した人の総数(回復した人を含む)、現在、感染状態でウイルスを保持している人の数、感染者の中で検査を受けることができて陽性の判定を受けた人の数、を計算しています。

細かいことですが、乱数を使って感染を偶然の確率に任せているので、シミュレーションでは、非常に幸運が重なる場合と、不幸が重なる場合が起こります。このため結果に大きさはばらつきがでます。それで、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。予想される感染報告数には標準偏差で誤差棒をつけています。

2.2 結果

単純なモデルですが、図 1 のように現実の感染の報告を再現するシミュレーションができます。比較していただきたいのは、「検査して感染者として判定された人数」の予測値(シミュレーション)(黄色)と厚生労働省の発表の感染者数患者数(黒い○)です。両者は非常によく一致していて、これによって一人の感染者が何人にうつしているか、感染の因子 r の値が、数量的にわかりました。 $r = 1.5$ 人です。

グラフをみて、厚生労働省のデータの方が少ないので、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 はあるていど減少させることに成功していると考えてみます。そこで、3月13日以降 $r = 0.882$ として、7月末まで計算をするめました。結果は図 2 のようになります。 $r < 1$ なので感染は終息し、その時期は7月末です。

一人の人がうつす平均の人数を 1 以下にすれば、終息する。

ことが確信できました。

r をいくつか試して計算してみるとわかるのですが、例えば、3月13日以降 $r = 1.155$ だったと仮定した場合でも、厚生労働省の結果とほぼ矛盾がないのですが、収束せず感染者数が増え続けます。図 3 のようです。7月末には感染者数は 3 万人を超えています。

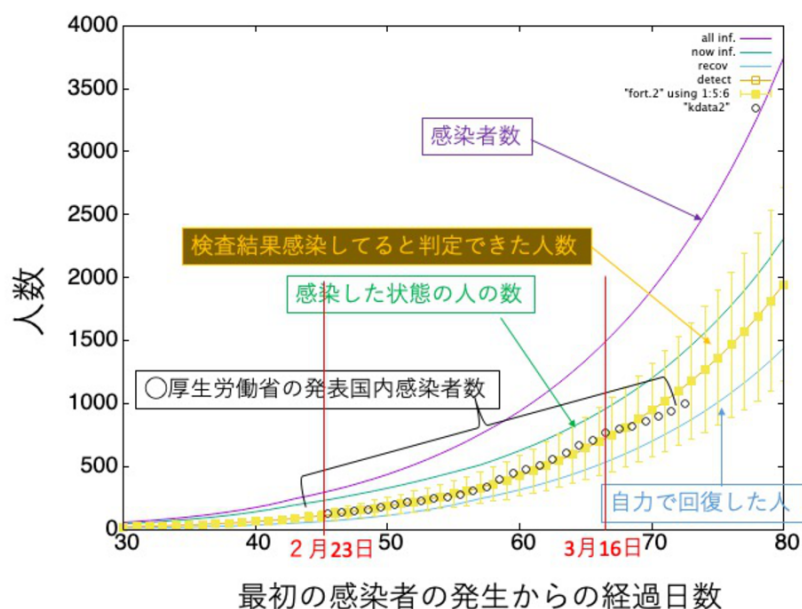


図 1: コンピュータシミュレーションによる感染拡大予想と実際の推移

3月20日までのデータでは r は 1 ± 0.2 の状態であり、収束できるか指数関数的な増加をするかいずれの可能性もあり、両者の境界にいますがわかります。

「現在は重大な局面にあります」と言わないで、「現在の感染者数から一人が何人に感染させるかと計算すると、0.8から1.2の間にありあす。0.8なら8月には終息、1.2なら急激増え8月には3万人を超えます。」と専門家は言ってもいいと思いました。

(以上は報告その1の繰り返し)

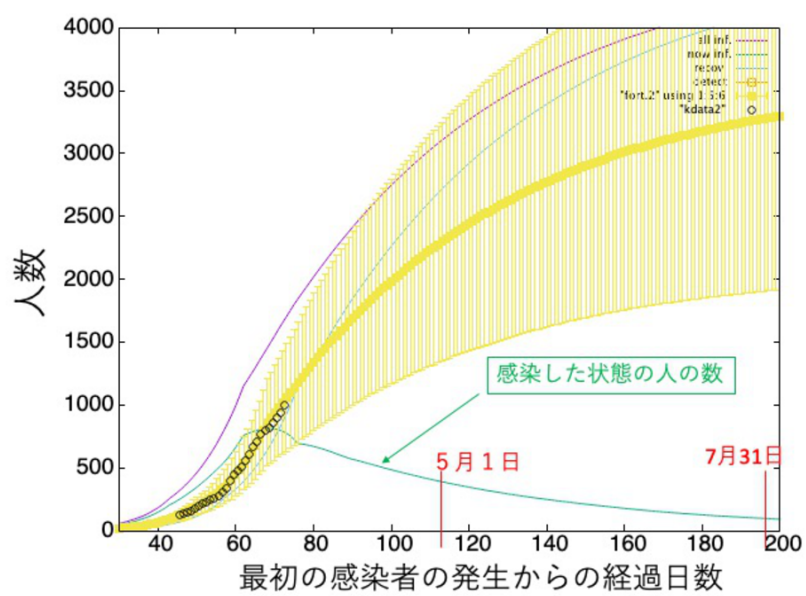


図 2: 3 月 13 日以降 $r = 0.84$ にできたと仮定した場合の予想。

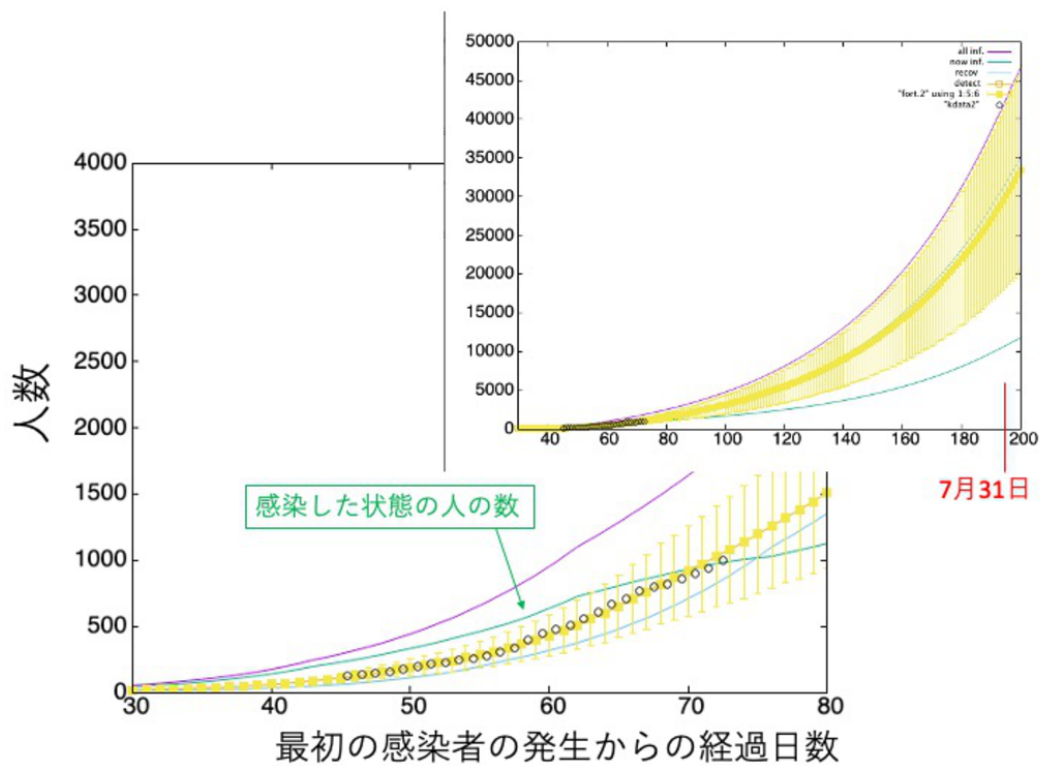


図 3: 3 月 13 日以降 $r = 1.155$ だったと仮定した場合の予想。

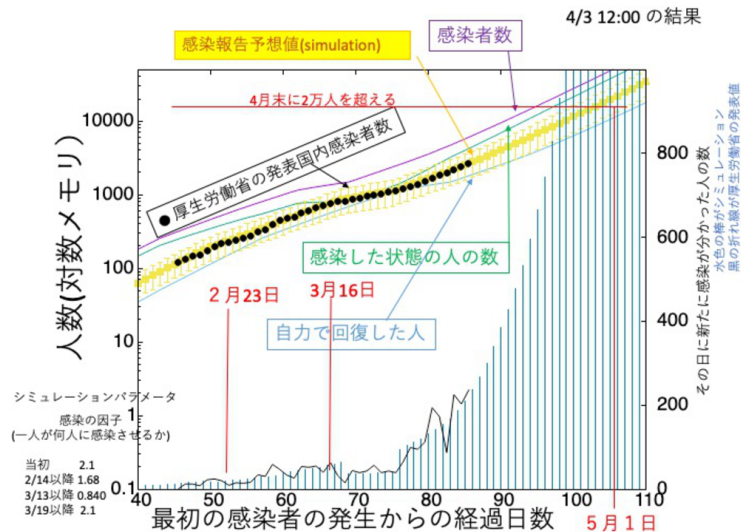


図 4: 4月3日までのデータに合わせたシミュレーションの結果。 $r = 2.1$ 程度になっています。

3 指数関数的な増加に

現実 is 厳しく、今日のデータを見ると r は 2 程度になってしまいました³。指数関数的に増加しています。

グラフの見方を説明します。やはりシミュレーションでの感染者数 (黄色いグラフ) と厚生労働省の実際の感染者数の報告 (黒丸) を比較してください。あってますね。前と違うのは縦軸です。グラフの左側のメモリをみてください。増加が著しいので縦軸が対数になっています。なので、メモリが 100、1000、10000 となっています。現状では、5月初旬には感染者数は 2 万人を超えます。

1 日新たに確認された感染者数が重要ですので、次に新しく、水色の縦棒と黒の折れ線グラフを加えています。右側の縦軸の目盛りをよみとってください。1 日の新たに感染が確認できた人数の目盛りです。水色の

³ $r = 2$ になってしまった理由は、私は専門家ではないのでわかりません。シミュレーションをやった感想としては、(1) 軽い症状のまま感染を許すケースが多発してしまった、(2) 海外からの感染者の帰国流入が多かった (このケースを封じ込めなかった)、のが大きいような気がします。もちろん、シミュレーションでこれらの効果をいれて計算することも可能ですが私はやっていません。感染の専門家の皆さんは豊富なデータをもっている、そのような効果もいれて、実質的な r の値を掴んでいるはずで

縦棒は予想、黒い折れ線は実際の報告数です。これもよくあっています。

次の疑問は、

治療薬がない状態で、指数関数的増加が続いたら (感染爆発したら) どうなっちゃうのだろう。

です。

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大変だったので、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ました。やっていると、 $r = 2$ なのに 4 ヶ月ほどで終息する結果が出ました。図 5 です。計算結果をよく調べてみると、ウイルスをうつそうとした時に、うつす相手がすでに感染していて、免疫をもっているのでうつらないという現象が起きていました。

理屈はとても簡単です。感染の因子が 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。事実上の感染の因子が 1 になってしまうわけです。これが感染爆発の時の終息メカニズムです。

人口の大多数が感染して免疫を持てれば終息します。

(数学的記述が欲しい方のために)

人口のうちのまだ感染していない人の割合を f とします。感染している人の割合は $1 - f$ です。この時は、事実上の感染の因子は rf で、これが 1 より小さくなれば後は終息に向かいます。

公式的にまとめておくと；終息に失敗し、指数関数的増加を起こした場合は、感染した人の割合が $1 - \frac{1}{r}$ になったら感染のピークになり、後は終息に向かう。

現在 $r = 2.1$ なので、人口の 52% が感染したところあたりから終息が始まる。(シミュレーションの結果では、最終的には人口の約 80% が感染する。)

4 作戦

4.1 全体として

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した：

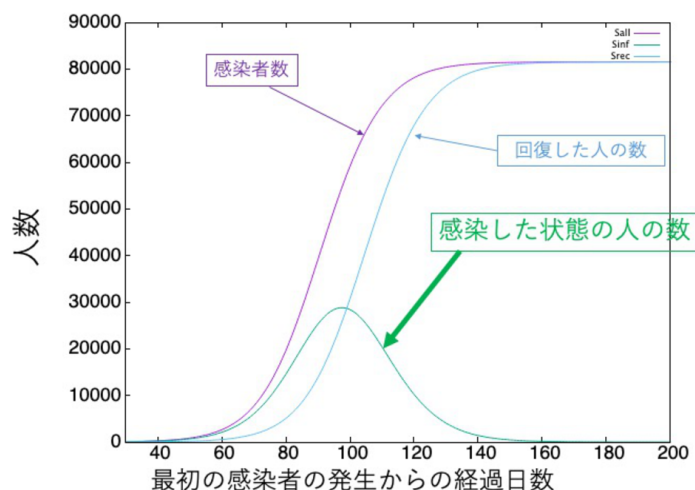


図 5: 人口 10 万人で $r = 2$ の場合の計算。5 万人が感染したところで、増加が鈍り始め、8 万人が感染したところで終息する

抑止終息 感染の因子 r を 1 以下に感染を抑止することができた場合。

飽和終息 感染因子 1 以上で、全人口の多くが感染し免疫を持った場合。

という二つです。

抑止終息の場合は非常に小さな被害ですみます。できるだけこうしたいです。ただし、常に外部からまた感染が流入する危機がありますので、再流行が起こります。毎回対応を怠ることはできません。

次に飽和感染 (感染爆発) の場合ですが、どうせみんな感染するのだから対策しないでもよいのでは？ 極端な話、早くみんな罹ってしまえばいいと思う人もいるかもしれませんがそうではありません。特に、今回のように死亡率が高い場合はこの考えは正しくありません。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 6 と前の結果図 5 とを比べてみましょう。

少しでも抑止して $r = 1.5$ にした方が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ます (25 % 源)。死亡者数もそれだけ減少するはずですが。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。より重要なのはピーク時の感染者数とピークがやって来る時期です。 $r = 1.5$ であれば $r = 2$ に比べて 50 日もピークがやって来る時期

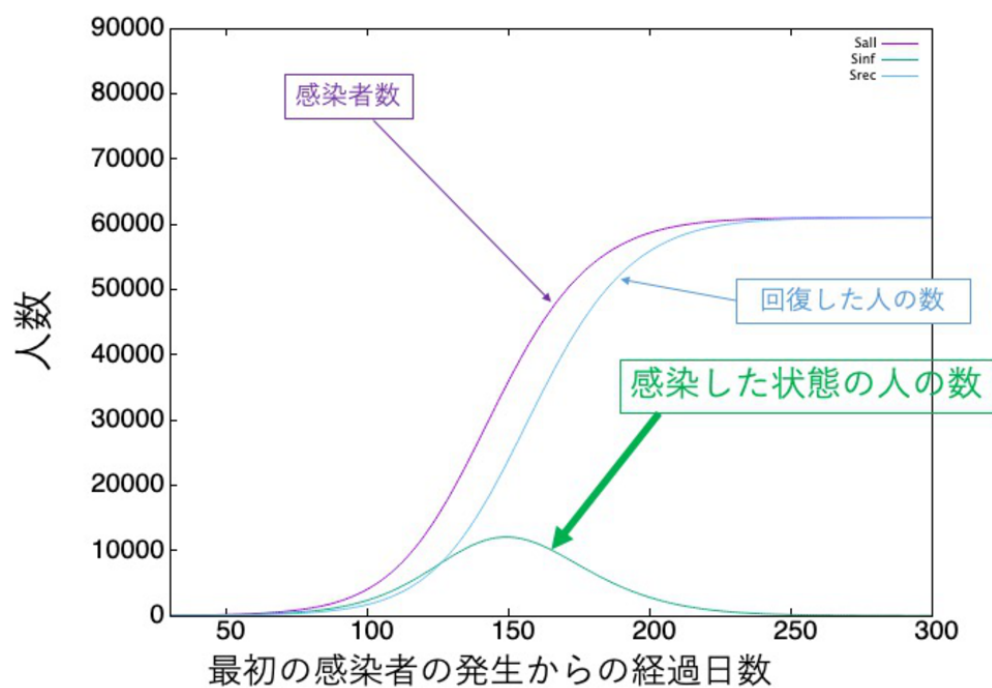


図 6: 人口 10 万人で $r = 1.5$ の場合の計算。約 3.3 万人が感染したところで、増加が鈍り始め、6 万人が感染したところで終息する

が遅れます。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。ピーク時の感染者数が多いといわゆる医療崩壊を招きます。そうすると、死亡率が増加してしまいます。人口の内の大多数が感染し免疫を持つところまで行くにしても、できるだけ r 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かどうか非常に重要になります。図4をみると4月中に、1日の新たな感染者数が千人を越えるためそれらすべての感染者を医療機関の受け入れることができなくなります。

結論。

感染爆発が起こった場合でもできるだけ感染の因子 r を減らすことで、感染者数のピークを遅らせて且つ高さを下げることができちつとした医療を施すことができる。トータルの感染者数も少なくなる。

今日の結果、図4、をみると23日で感染者数が一桁増加します。この23日以内に、抑制しないと医療崩壊が予想されます。

4月5日に強力な抑制策(外出禁止など強い抑制)をして、せめて $r = 1$ にできればかなり医療現場はたすかることになる。これは図7の結果になり、1日の発生数を400人前後に押さえ込めます。

4.2 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、あるいは、閉鎖された一つの都市)を扱ってきました。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。現在、私は、そのような空間分布をいれたシミュレーションのプログラムを書いて調べようとしています。

大都会は飽和終息したけれど、ある地域は抑制終息できた、というようなこともあり得るからです。交通機関の遮断の効果を見ることもできます。

今回の報告はここまでとします。

改訂記録

4月6日：感覚的表現をしないでできるだけ具体的な数値をあげて説明したい、というのがこの報告の主張の一つです。それで、感染爆発という言葉は最初の原稿では多く使われていましたが、それを指数関数的増加という数学的な表現に変えました。また、数値を入れる部分を多くしました。 r を少なくすると感染ピークを低くする以外に、ピークが遅れることも追加。

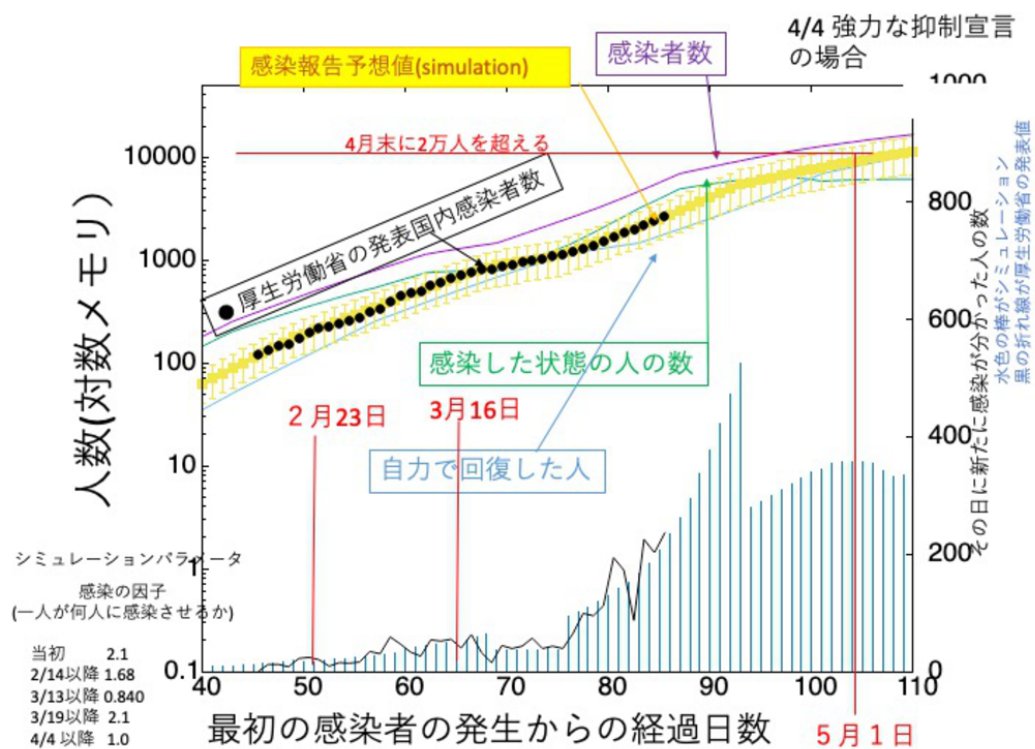


図 7: 4月5日から $r = 1.0$ にできた場合の計算。