

日本における COVID-19 感染のパラメータ推定

3, May, 2020

1 はじめに

この論考では、専門家会議の予測で用いられている新型コロナウイルス感染に関する様々なパラメータについて考察する。また、その結果から市中感染者の数の推定を行う。さらに、それらの結果から、検査を徹底して、感染者を積極的に発見することが、接触率削減と同じ程度かそれ以上の効果があることや、IT 技術なども併用することで、効率的に実効再生産数を下げ、感染者数を急激に減少させる可能性などについて述べる。（なお、ここでは、前項（s-1）で述べた市中感染者を考慮した数理モデルを用いている。）

2 日本における COVID-19 感染のパラメータ推定

政府専門家会議の 4 月 22 日付けの意見交換会資料では、削減効果の予測に以下のパラメータが使われている。

$$R_0 = 2.5, \quad T_g = 4.8, \quad \gamma = 1/T_g = 0.2083 \quad (1)$$

ここで、 R_0 は基本再生産数、 T_g は回復または隔離までの日数を表している。これより、削減により新規感染者数が

$$80\% \text{ 減} \quad \lambda = -0.10417 \quad (2)$$

$$65\% \text{ 減} \quad \lambda = -0.02604 \quad (3)$$

という指数で減衰するというものだ。ただし、ここで λ は指数関数的な増加率を表しており、拙稿（S-1）でも述べたように、

$$\lambda = \gamma(r R_0 - 1) - \kappa \quad (4)$$

で与えられ、 r が接触削減率を表している。また、 κ は、市中感染者のうち感染が発見され隔離される割合を表している。

これにより、専門家会議は、8 割削減すれば約 15 日で新規感染者数が 500 から 100 へと、約 5 分の 1 に減少するとしている。観測の遅れを考慮しても 1 か月後には約 5 分の 1 に減少するという予測である、

ここでは、この予測の妥当性について検討したい。特に、ここで減衰の速さを決めているパラメータとして、 $\gamma = 0.2083$ という大きめの値を採用していることについて考える。（これは、回復または発見して隔離するまでの日数が $T_g = 1/\gamma = 4.8$ 日と想定していることから来ている。専門家会議は、これらのパラメータをドイツの初期の頃のデータを参考にしたと説明している。） γ の大きさは、ロックダウン後の感染者の減少速度に直接関係するので、重要なパラメータである。

通常は、回復までに2週間から4週間もかかると言われている新型コロナウイルスであるが、 $T_g = 4.8$ 日としているのは、いかにも短い気がする。入院患者に関しては、 $T_g = 14$ としても $\gamma = 0.07$ と小さな値になるし（岩波「科学」4月号の牧野氏の論考では、これを退院までの日数として、0.04と小さく見積もっている。[1]）、しかし、入院または隔離された患者は基本的に他に感染させないので、 γ としては、市中の軽症者も含めた感染者の平均的な回復率をとるべきである。（s-1で述べた γ と γ' は異なるパラメータであり、特に重傷者のみ検査して入院させる場合は、両者に大きな違いが生じるおそれがある）。しかし、市中の殆どの感染者は無症状か軽症として、数日で回復するとしても、本当に回復日数が4.8日（ $\gamma = 0.2083$ ）という推定は正しいのだろうか、と言う疑問が生じる。

γ は軽症者や無症状者も含めて、感染者の感染日から回復日までを大々的に調査することで情報が得られるはずであるが、現在そのようなデータはないので、すでに第一波が終息したと思われる中国と韓国のデータから γ の値を推定してみることにする。

長くなるので、詳細は別項で述べるが、 γ は次の範囲にあると考えられる。

$$0.1 < \gamma < 0.2 \quad (5)$$

以下では、専門家会議の資料で採用されている $\gamma = 0.20$ を使い、日本における他のパラメータの推定を行うことにする。基本再生産数も専門家会議と同じ $R_0 = 2.5$ とする。

- 2月中

この期間中は、全国で一日の新感染者数が10~20名の時期であり、感染経路の分からない事例はごくわずかであったことから、この時期は指数関数の増大率はゼロと考えてよいだろう。すると

$$\lambda = \gamma(R_0 - 1) - \kappa = 0.2 \times (2.5 - 1) - \kappa = 0.3 - \kappa \simeq 0 \quad (6)$$

から、 $\kappa = 0.31$ 程度であったと推察される。この時期は、市中感染者で有症の人は、ほぼ発見されていたと考えると、 $\kappa \simeq 0.3$ から、市中の感染者のうち有症者は全体の3割程度、無症状者または軽症で検査にかからなかった人は7割程度いたものと推定される。（ただし、サンプル数が10程度と少ないため、推定誤差は±50%程度である。）これは、COVID-19の場合、無症状者は7割から8割いるとも言われているので、その数値とも一致する。（同じことは、日本の空港での検疫で見つかった感染者の142名のうち無症状者107名[4月29日までの累積数]であることから裏付けられる。ダイヤモンド・プリンセス号における無症状者の割合は、 $331/712 = 0.42$ とやや少なめであるが、高齢者の比率が非常に高い集団であることから、市中感染者よりも無症状者の比率が低くなっているものと考えられる。）

- 4/15日頃

4月15日は、全国で新規感染者数が741名と最大となったが、その後徐々に減少を始めた時期である。検査の遅れなどを考えると、1日のみのデータで推定することは危険であるが、仮にこの時期がピークであり、増加指数が0になったと考えて、接触削減率を r とすると次のようになる。

$$\lambda = \gamma(rR_0 - 1) - \kappa = 0.2 \times (2.5r - 1) - \kappa = 0.0 \quad (7)$$

実際に、 κ がどの程度であったか推定することは難しいが、仮に κ を大きめに見て、 $\kappa = 0.1$ とすると、削減率は、 $r = 0.6$ （40%削減）、感染者の発見率を低めに見て $\kappa = 0.01$ と仮定すると（小田垣氏は0.03という推定値を出している[2]）、この時期の接触削減率は $r = 0.42$ （58%削減）程度であった

と言える。(κ を 0.1 または 0.01 と仮定することは同時に、市中の感染者数は、観測されている数値の 10 倍から 100 倍いと想定していることに相当する。)

3 PCR 検査、接触削減、ブルートゥースアプリによる総合対策

感染爆発を抑えるためには、(4) 式で表される増幅率 λ を負の値にすれば良い。あるいは、別の表現をすれば、次の式で与えられる実効再生産数を 1 以下にすれば良いので、PCR 検査を徹底し、発症前や無症状の感染者まで発見して κ を大きくするだけで、通常の接触削減をしなくとも実効再生産数を 1 以下に下げることが可能である。

$$R = \frac{r\beta N}{\gamma + \kappa} = \frac{\gamma}{\gamma + \kappa} r R_0 < 1 \tag{8}$$

この条件に、これまで推定したパラメーターである、 $R_0 = 2.5, \gamma = 0.2$ を代入すると、 $R < 1$ となる条件は以下で与えられる。

$$\kappa > 0.5r - 0.2 \tag{9}$$

これより言えることは、 $\kappa > 0.3$ であれば、接触削減率が 0%($r = 1$) でも感染爆発を抑えることができることである。国外からの感染者流入の初期(例えば 2020 年の 1 月または 2 月頃)のように、国内の感染者数がそれほど多くなく、感染経路が追える場合は、濃厚接触者だけでなく、一定時間以上接触した恐れのある人は徹底的に検査し、無症状者も含めて感染者を積極的に見つけることで κ を大きくすれば、接触削減がなくとも爆発を抑えることが可能となる。また、この推定が正しければ、感染経路の分からない有症者が新規感染者の 1 割を超えると、その 2 倍以上の軽症者や無症状者が市中に在ることになり、3 割の感染者を発見できる限界を超えていることになり、そのまま放っておけば感染爆発が避けられないことがわかる。スーパースプレッダーの濃厚接触者を集中的に見つけるという対策は一見効率的であるが、積極的な検査により、感染経路の分からない感染者を 1 割以下に抑える方が、長期的には有利であることが分かる。

感染者の発見率を向上させると、接触削減率が十分でなくとも、実効再生産数を 1 以下にすることが可能である。そのことを示したのが図 1 である。

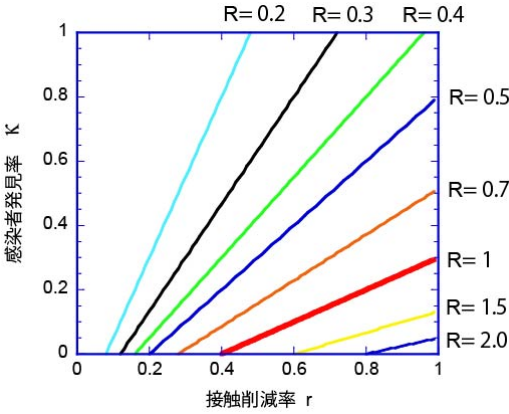


図 1 検査率と接触削減率に対する実効再生産数

さらに、他の論考でも述べたが、ブルートゥースアプリなどを利用する効果は、プライバシーを侵害せずに、感染者が発症する前に一定時間以上接触した人にそのことを知らせ、自分が発症する前に自主的

に隔離することで他への感染を防ぐことが出来る。この方法でも、2~3割の接触削減率に相当するとの研究があるので [3]、それらを併用することによっても、接触削減率の不足を補うことも可能である。また、一旦、感染爆発が起こった後でも、行動規制を行わずに、ウイルスを封じ込める方法としては、極論であるが、全国民に PCR 検査を行い、市中にいる感染者の 3 割を早期に発見し、隔離または自宅待機させることができれば、実効的再生産数は 1 以下となり、感染者とウイルスはゼロに近づき、最後は自然消滅する（海外からの流入は検疫と 2 週間待機により原理的に止めることが可能である）。この場合、潜伏期間中の感染者の存在も考えられるので、検査は 3 回程度行うことが必要かもしれない。一旦、市中感染者が増えてしまった場合に、なるべく急速に感染者を減らす方法としては、 κ の値をなるべく大きくし、接触削減と併用すれば、増幅率 λ が負の大きな値となり、急速に感染者を減らすことが可能である。下図は、 κ と r のパラメータ空間で、減少の速さ（ λ の負の大きさ）がどうなるかを示したものである。例えば、接触削減 8 割で、なおかつ、検査で 3 割の感染者を発見できれば、感染者の減少率は 12 日間で 100 分の 1 以下、一か月で 1 万分の 1 以下に減少する。

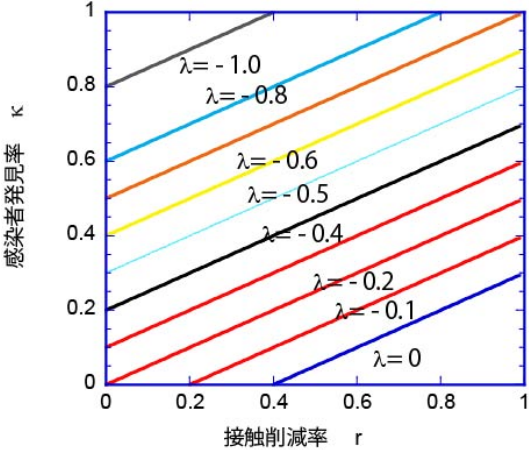


図 2 検査率と接触削減率に対する感染者減衰率

参考文献

- [1] 牧野淳一郎、「科学」、5月号 (2,020、岩波書店)
- [2] 小田垣 孝、私信
- [3] L. Ferretti et al. , Science 10.1126science.abb6936 (2020).

佐野 雅己 (Masaki Sano)