

触媒懇談会ニュース

触媒学会シニア懇談会

新型コロナウイルス考

出口 隆

1. はじめに

新型コロナウイルスによる感染拡大に伴う緊急事態措置が4月7日から5月6日まで実施されてきたが、さらに5月末日までに延期された。まだ終息には程遠いようだが外出自粛に代表される対策の効果は感染者数の推移によく現われている。国内感染を終息させるために、接触を80%減らして実効再生産数(R_0)をそれまでの2.5から0.5に減らすことが目標とされた¹⁾。 R_0 は1人の感染者が他の何人に感染させるかを示すもので、 R_0 が1より大きくなると感染が拡大すると説明されている。ちなみに実効再生産数に対して基本再生産数という用語もあり、こちらは免疫を持たない集団内で、一感染個体により直接生み出される感染個体数の平均とされる²⁾。こちらも R_0 と表されているが、最も重要な用途は新興感染症が集団内に蔓延するかどうかを決定することと、感染症を撲滅するためには集団のどのくらいの割合にワクチン接種をして免疫化すべきなのかを決定することであるという²⁾。麻疹は基本再生産数の値が12~18と非常に大きく、天然痘やポリオも5~7と大きい。これに対してインフルエンザは2~3と比較的小さく、COVID-19は1.4~6.6と報告されている²⁾。

新型コロナウイルス感染症対策専門家会議の資料には実効再生産数を2.5から0.5に減らした場合の感染者の推移を予測した結果も示されている¹⁾。しかし時間の単位を含まない R_0 という指標を用いてどうすれば時間変化が計算されるかを不思議に思っていた。

2. 反応速度式に類似した数理モデル

感染症の数理モデルをインターネットで検索したところ「SEIR モデル」に行き当たった³⁾。これはS:感染症に対して免疫を持たない者(Susceptible), E:感染症が潜伏期間中の者(Exposed), I:発症者(Infectious), R:感染症から回復し免疫を獲得した者(Recovered)の人数がどのように変化するかを予測するものであり、この4つの変数を含む連立微分方程式が示されている。実はこの微分方程式は化学反応の速度式と非常に類似しているのだ。感染者と健常者が接触して健常者が減少していく様子は、まさに $A + B \rightarrow C$ の二次反応の速度表現と同じであり、感染者が治癒していく過程は一次反応の速度式そのものだ。この概念は化学者にとって大変受け入れやすいものである。本稿ではEの段階を無視して次のように連立微分方程式を簡略化した。このことによ

って正確さを欠くことにはなるが本質は損なわれないだろう。免疫を持たない健常者(S)の数を X ，感染している人(I)の数を Y ，回復して免疫ができた人(R)の数を Z とし，人の総数を $N (= X + Y + Z)$ とする。 X ， Y ， Z の時間変化は(1)～(3)式で表される。 k_1 は感染速度を表す定数， k_2 は回復速度を表す定数であり，それぞれ反応速度定数に対応する。 k_1 ， k_2 と X ， Y ， Z の初期値を与えれば数値積分 Runge-Kutta 法によって X ， Y ， Z の変化を計算することができる。

$$dX/dt = -k_1XY/N \quad (1)$$

$$dY/dt = k_1XY/N - k_2Y \quad (2)$$

$$dZ/dt = k_2Y \quad (3)$$

ところで上式には R_0 に対応する概念が表れていない。そこで(1)式を(3)式で除して符合を入れ替えると(4)式が得られる。

$$-dX/dZ = (k_1/k_2)X/N \quad (4)$$

$X = N$ のとき，(4)式は(5)式のようになる。

$$k_1/k_2 = (-dX/dZ)_{X=N} \quad (5)$$

(5)式の意味するところは， $X = N$ のとき，すなわち免疫を持つ人がゼロのとき， k_1/k_2 の値は 1 人が免疫を獲得するごとに何人が感染するかという比率を表しており，これは基本再生産数に他ならない。 R_0 は無次元であるから k_1 または k_2 と一緒に用いなければ感染数の予測に結びつかない。

$$R_0 = k_1/k_2 \quad (6)$$

3. ケーススタディー

N として東京都の人口 14 百万人を設定し，初期条件として感染者 $Y_0 = 5000$ 人がおり，便宜上初期の回復者 $Z_0 = 0$ とする。回復速度は半減期を 7 日と仮定して $k_2 = 0.1$ (/day)に固定した。 k_1 (/day)の値を変えてシミュレーションを行った。

Fig. 1 は感染速度が比較的大きい $k_1 = 0.5$ ($R_0 = 5$) の場合を示す。感染防止対策を全くしないと，感染が急激に広がり 1 か月もしないうちに 700 万人にも増えてピークとなった。感染爆発である。 Fig. 2 は $k_1 = 0.2$ ($R_0 = 2$) であるが，感染拡大は Fig. 1 より緩

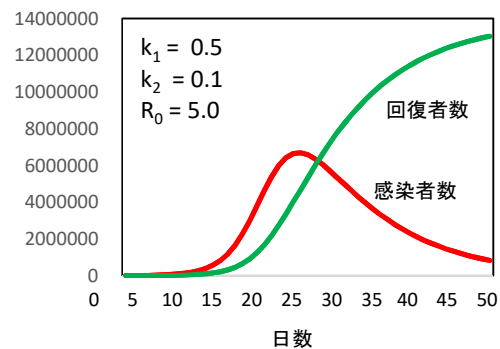


Fig. 1. $R_0 = 5.0$ の場合の感染拡大. $N = 14$ 百万， $Y_0 = 5,000$. ピークにおける感染者数は 700 万人に及ぶ。

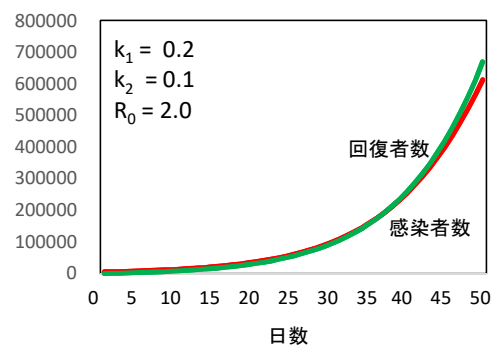


Fig. 2. $R_0 = 2.0$ の場合の感染拡大. $N = 14$ 百万， $Y_0 = 5,000$. 一か月で感染者は 10 万人を超す。

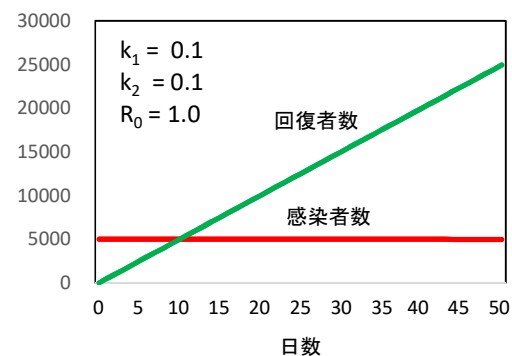


Fig. 3. $R_0 = 1.0$ の場合の感染者推移. $N = 14$ 百万， $Y_0 = 5,000$. 感染者数は横ばいとなる。

やかになったが、50 日でも感染が増加中で 78 日目に 215 万人のピークとなった。これらに対して Fig. 3 は $k_1 = 0.1$ ($R_0 = 1$) の場合であるが、感染者数は横ばいが続き、新たな感染者の数だけ回復者が増えることが判る。 $k_1 = k_2$ の結果である。さらに Fig. 4 は $k_1 = 0.05$ ($R_0 = 0.5$) と R_0 が 1 より小さい場合であるが、感染者数は最初から減少を続けてやがて終息することが判る。回復者数の累計も約 1 万人に過ぎず、大半の人は感染せずに終わる。但しこのことは大半の人が免疫を持たないことを意味し、将来の感染リスクを含む。 Fig. 5 は Fig. 1 と同じ $k_1 = 0.5$ ($R_0 = 5$) であるが、初期の感染者数が 1 名だった場合である。急激な立ち上がりまでには日数がかかるが、やがて爆発的に

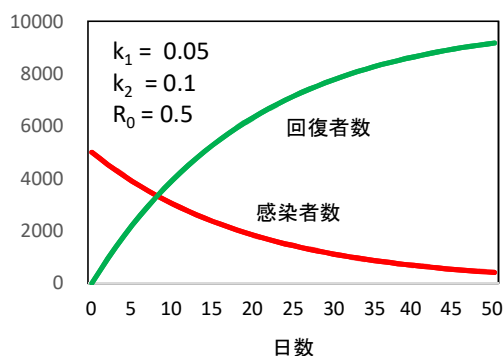


Fig. 4. $R_0 = 0.5$ の場合の感染者推移. $N = 14$ 百万, $Y_0 = 5,000$. 感染者数は減少して終息する.

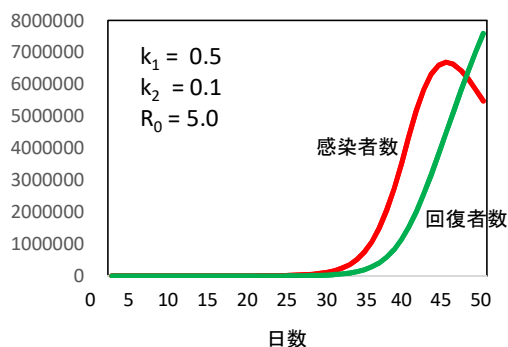


Fig. 5. $R_0 = 5.0$ で $Y_0 = 1$ の場合の感染者推移. $N = 14$ 百万, 急激な立ち上がりは遅れるが感染爆発が起こる.

感染が増えることが判る。日本はクラスターを発見して除去していくというやり方で急速な立ち上りを遅らせてきたと言えるが、抜本的には R_0 を 1 より小さくするしか解決法はないということが判る。

以上は R_0 を 1 よりも小さくすることの重要性を示すが、これは感染速度 k_1 をある程度以下に抑制することに他ならない。三密を避ける意味がここにあり、一旦終息しても油断すると元の木阿弥になるところが厄介である。

最後にワクチンの効果について検討した。 Fig. 6 に $R_0 = 5$, $Y_0 = 1$ の場合のシミュレーション結果を示す。ワクチンを投与された人すべてが免疫を獲得すると仮定した。ワクチン投与率によって効果が異なり投与率が高くなるほど感染の立ち上がりが緩やかになるが、実質的な効果が認められるのには 75% の投与率が必要である。 R_0 が小さいほど低い投与率で効果があり、データは示していないが $R_0 = 2$ の場合は 25% の投与率で 100 日後の感染者数が 150 人以下であった。

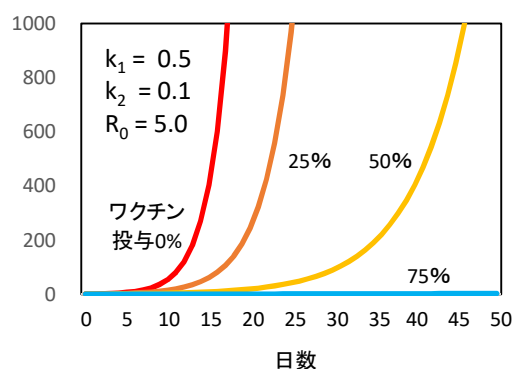


Fig. 6. ワクチン投与の効果. $R_0 = 0.5$, $N = 14$ 百万, $Y_0 = 1$. ワクチン投与率 0%, 25%, 50%, 75% に従って、 Z_0 は 14 百万, 10.5 百万, 7 百万, 3.5 百万となる.

以上は感染症の数値モデルという専門外の分野で、反応速度解析の経験だけを頼りに素人の考察を加えたものであり、誤解や間違いを含むと思われるし、もっと分かりやすい文献もあるに違いない。お気づきのことがあれば是非ご指摘いただきたい。

ように人類の叡智が結集されることを願うばかりである.

1) 新型コロナウイルス感染症対策専門家
会議「新型コロナウイルス感染症対策の状
況分析・提言」（2020 年 4 月 22 日）

3) <https://qiita.com/PixelPenguin/items/a663296e320158e108c7>

- 4 -