

検出隔離による抑制対策下のウイルス感染の数理モデル(第2報)

— COVID-19 の世界的感染状況と突発的感染流行対策への提言 —

氏家脳神経外科内科クリニック
坂本 治久
氏家 弘

現在、人類は、世界的パンデミックを引き起こした新型コロナウイルス感染症 COVID-19 の制圧に全力を挙げて取り組んでいる。これに資するため、前稿では、検出隔離による抑制対策が実施されている状況下での新興感染症の流行を定式化する新たな数理モデルを提案した。本稿では、そのモデルに基づいて、世界主要国の COVID-19 の感染流行を定量評価するとともに、第一波の流行の終息後も避けがたい突発的感染流行の対策法について考察する。

1. はじめに

新型コロナウイルスによる感染症 COVID-19 の感染流行は、217 ヶ国・地域に及び、積算感染者数約 3500 万人、死者 100 万人を超える極めて大規模なパンデミックを引き起こしている¹⁾。天然痘や季節性インフルエンザなどの一般的感染症は、罹患やワクチン接種による抗体保有者を増やして集団免疫を形成して流行を終息させる。しかし、COVID-19 の致死率が季節性インフルエンザの数十倍に達するため、ワクチンや治療薬が存在しない状況での集団免疫の形成は、感染による死者を多く出すことになるため、得策ではない。COVID-19 のような新興感染症は、適切な感染抑制対策によって感染者数を可能な限り少なく抑えて感染流行を終息させる必要がある。

感染抑制対策は、適切な数理モデルを活用することで合理的に運用及び評価ができる。新興感染症の第一の感染抑制対策は、感染者の検出および隔離によって二次感染源となる潜在感染者を減らすことであり、数理モデルは、その検出隔離のプロセスを明示的に表すことが求められる。

本稿では、前報²⁾にて提案した検出隔離のプロセスを表現できる新興感染症のための感染流行モデルを概説し、それを COVID-19 の感染流行に適用し、世界の主要国における感染流行状況と各国の抑制対策を定量的に評価する。さらに、第一波の感染流行の終息後も避けがたい突発的感染流行に対する対策について検討する。

2. 新興感染症のモデル化²⁾と COVID-19 の特性値

感染流行モデルは、感染流行の規模と抑制対策の定量的評価に用いられる。新興感染症の感染流行モデルでは、検出隔離による対策を評価するために、次の3条件を満足することが求められる：

- ①感染者数 I が総人口 N に対して著しく小さくてもパラメータを安定して同定できる；
- ②検出隔離のプロセスとそのパラメータを明示的にモデル化できる；
- ③感染流行の進行過程を数式で表せる。

検出隔離による抑制対策下の感染流行は、次の3つの過程に分けると定式化できる：

- 1) 潜在感染者 $I_{res(n-1)}$ からの感染者 $R_{sc(n)}$ の検出；
- 2) $R_{sc(n)}$ の隔離；
- 3) 残存する潜在感染者 $I_{ac(n)}$ からの二次感染による潜在感染者数 $I_{res(n)}$ の更新。

表1は、このモデルに用いるパラメータの一覧を示している。感染者数は、潜在していて未知な感染者数 (I_{ac} , I_{res}) と検出されて明白な感染者数 (R_{sc} , R_{ac}) の二つに大別される。疫学的に定まる感染特性値は、感染寿命 T と基本再生産数 R_0 である。 T は、感染者が発症から隔離されることによって感染機会を失うまでの平均日数を意味し、 R_0 は、一人の感染者からの二次感染によって T 日後に到達し得る感染者数の平均値を意味する³⁾。これらの特性値は、後述の式(10)によって日割基本再生産数 r に換算してモデルに組み込まれる。 r は、感染者一人に起因する一日後の感染者数すなわち一日当たりの基本再生産数として

表 1 感染進行モデルに用いるパラメータ

項目	記号	単位	備考
感染に寄与し得る感染者数	I_{ac}	人	
市中に残存する感染者数	I_{res}	人	初期値 $I_{res(0)}$
検出された感染者数	R_{sc}	人	
検出された積算感染者数	R_{ac}	人	初期値 $R_{ac(0)}$
ウイルスの感染寿命	T	日	
ウイルスの基本再生産数	R_0	人	
日割り基本再生産数	r	人/日	
日割り実効再生産数	r_{eff}	人/日	
感染者検出率	k	比率又は%	
感染者の臨界検出率	k_{cr}	比率又は%	

定義される。感染者検出率 k は、潜在感染者の中から感染者を検出する割合を意味する。

これらのパラメータを用いると、新興感染症の感染進行過程は、式(1)~(4)のように定式化できる。初期値は、評価の原点とする日の時点で既に市中に残存している未知の潜在感染数 $I_{res(0)}$ と既に公表されている積算感染者数 $R_{ac(0)}$ である。

$$R_{sc(n)} = kI_{res(n-1)} = kr^{n-1}(1-k)^{n-1}I_{res(0)} \quad (1)$$

$$I_{ac(n)} = I_{res(n-1)} - R_{sc(n)} = r^{n-1}(1-k)^n I_{res(0)} \quad (2)$$

$$I_{res(n)} = rI_{ac(n)} = r^n(1-k)^n I_{res(0)} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R_{ac(n)} &= R_{ac(n-1)} + R_{sc(n)} \\ &= R_{ac(0)} + kI_{res(0)} \sum_{i=1}^n \{r(1-k)\}^{i-1} \\ &= R_{ac(0)} + \frac{1 - \{r(1-k)\}^n}{1 - r(1-k)} kI_{res(0)} \end{aligned} \quad (4)$$

これらの式は、経過日数 n 日目の感染者数を表している。式(1)の検出感染者数 $R_{sc(n)}$ は、前日の潜在感染者 $I_{res(n-1)}$ から検査によって特定される感染者数を表している。式(2)の感染に寄与し得る感染者数 $I_{ac(n)}$ は、 $R_{sc(n)}$ を隔離したことで減少した市中の潜在感染者数を表しており、これがその日の二次感染源となる。式(3)の $I_{res(n)}$ は、検出、隔離および二次感染の過程を経た 1 日後の潜在感染者数を表している。式(4)の積算感染者数 $R_{ac(n)}$ は、検査によって存在が特定さ

れる $R_{sc(n)}$ を日々積算した感染者数であり、この値が日々公表される感染者数と対応する。 R_{sc} 、 I_{ac} および I_{res} は、いずれも $r(1-k)$ を底とする指数関数で表される。一方、 R_{ac} は、初期値 $R_{ac(0)}$ に $r(1-k)$ を公比とする等比級数を加算した式として定式化できる。

式(5)は、これらの関係式に共通する因子 $r(1-k)$ を日割実効再生産数 r_{eff} として再定義している。 r_{eff} は、潜在感染者数の日毎の実効的な増減速度を表す。

$$r_{eff} = r(1-k) \quad (5)$$

感染の進行状態は、連続した 2 日間の潜在感染者数 $I_{res(n)}$ および $I_{res(n-1)}$ の間での大小関係によって決まる。式(3)および式(5)より $I_{res(n)}$ と $I_{res(n-1)}$ の関係が式(6)のように表せるので、感染の拡大、平衡および抑制は、それぞれ $r_{eff}>1$ 、 $r_{eff}=1$ および $r_{eff}<1$ と対応する。

$$I_{res(n)} = r_{eff} I_{res(n-1)} \quad (6)$$

r_{eff} を用いると、 I_{res} および R_{ac} は、それぞれ式(7)および式(8)のように簡素化できる。潜在感染者数は厳密には知り得ないが、公表される積算感染者数に式(8)を当てはめてパラメータ同定すれば、感染状態は、定量的に把握し、評価できるようになる。

$$I_{res(n)} = r_{eff}^n \cdot I_{res(0)} \quad (7)$$

$$R_{ac(n)} = R_{ac(0)} + \frac{1 - r_{eff}^n}{1 - r_{eff}} kI_{res(0)} \quad (8)$$

日割基本再生産数 r は、これらの基本式と、感染特性値 T および R_0 の定義に基づいて定められる。定義よれば一人の感染者が感染寿命 T 日後に感染者数 R_0 人になるので、式(7)において $r_{eff}=r$ および $I_{res(0)}=1$ として式(9)および式(10)が導かれる。

$$R_0 = r^T \quad (9)$$

$$r = R_0^{1/T} \quad (10)$$

COVID-19 の基本的な感染特性値は、1 月 23 日までの武漢市における感染事例に基づいて算出されている⁴⁾。基本再生産数 R_0 は、2019 年 12 月 29 日までの感染流行の極初期には 7.93 という極めて高い値であったが、2020 年 1 月 23 日までの平均は 2.90 で

あった。一方、感染寿命 T は、1月9日までは6.7日であったが、平均は2.9日であった。

したがって、式(10)より、COVID-19の r は、極初期に1.3621、平均で1.4436と計算できる。いずれも1.4前後のほど近い値なので、本稿でも平均値1.4436を用いる。SARSでは $r=1.15$ であったので、COVID-19の方が格段に感染力が強いとわかる⁴⁾。

感染者検出率 k は、式(5)に基づいて式(11)により定められる。ここで感染の平衡状態 $r_{\text{eff}}=1$ に対応する k を臨界値 k_{cr} とすると、 k_{cr} は、式(12)に定義でき、 R_0 および T によって定まる。式(13)に示すように、 $k > k_{\text{cr}}$ の時、 $r_{\text{eff}} < 1$ となり、感染を抑制できる。COVID-19は $k_{\text{cr}}=30.7\%$ なので、その感染は、感染者を30.7%より高い率で検出隔離すれば抑制できる。

$$k = 1 - \frac{r_{\text{eff}}}{r} \quad (11)$$

$$k_{\text{cr}} = 1 - \frac{1}{r} = 1 - R_0^{-1/T} \quad (12)$$

$$k > k_{\text{cr}} \quad \therefore 1 - \frac{r_{\text{eff}}}{r} > 1 - \frac{1}{r} \quad \therefore r_{\text{eff}} < 1 \quad (13)$$

3. COVID-19の世界的な感染流行状況

3.1 主要国における感染流行状況

R_{ac} 公表値⁵⁾にこのモデルを適用すると、各国の感染流行を定量的に評価できる。ここでは、世界の主要国としてアジアから6か国(中国、韓国、日本、タイ、インド、イラン)、欧米から6か国(アメリカ合衆国、イギリス、イタリア、フランス、ドイツ、ロシア)を取り上げて、WHOが日ごとの感染流行状況を公表した8月16日までの感染流行の推移を概観する。

図1は、各国の感染状態の推移を示している。縦方向は、下辺が1月16日、上辺が8月16日になるように時間経過を表している。感染状態は、 r_{eff} に基づいて次の8段階に分けている：■急激拡大状態 ($r_{\text{eff}} \geq 1.4436$)；■重度拡大状態 ($1.4436 > r_{\text{eff}} \geq 1.3$)；■中度拡大状態 ($1.3 > r_{\text{eff}} \geq 1.15$)；■軽度拡大状態 ($1.15 > r_{\text{eff}} \geq 1.05$)；■準平衡状態 ($1.05 > r_{\text{eff}} \geq 1.0$)；■平衡状態 ($1.0 > r_{\text{eff}} \geq 0.95$)；■抑制状態 ($0.95 > r_{\text{eff}} \geq 0.9$)；■高度抑制状態 ($r_{\text{eff}} < 0.9$)。

概略的に、赤系の色で表される感染拡大期は、1

～4月および5月以降の2期に分かれて発生しており、それぞれ第一波および第二波の感染流行と見做せる。例外はインドとロシアのみであり、前者では第一波が収まらずに継続して拡大し続けており、後者では第二波の流行を防いで抑制状態を維持している。

インド以外の国では、第一波流行後に青系の色で表される感染抑制状態に転換している。この転換は、都市封鎖などの強力な抑制対策の効果を表している。中国、韓国、日本およびタイは、第一波流行後に $r_{\text{eff}} < 0.95$ となっている時期があり、抑制対策が特に効果的に実施されたと言える。

ロシアを除くすべての国で感染は、(一時的に、ではあれ)再び拡大状態に戻った。これは、第一波の流行が抑制段階に転換したのに伴って人の往来の規制を緩和したことが影響したと思われる。次章で詳述するようにCOVID-19の二次感染が潜伏期間中に始まるため、他所からの感染者流入による突発的感染流行は防げない。

第二波以降の感染流行は、人類の社会活動の再開に伴って突発的に発現する不可避な感染流行である。今後の“ポスト・コロナ時代”は、突発的流行の発現を前提として、それをできるだけ早く特定し、集中的かつ強力な二次感染抑制対策の実施により、社会的影響を最小限度に抑え込むことが求められる。

中国、タイおよびアメリカでは、第二波流行もピークを越えており、抑制段階に推移している。特に中国では第二波流行後にも第一波流行後と同様に $r_{\text{eff}} < 0.95$ となっており、強力な感染抑制対策が実施されたことを示唆している。

一方、ヨーロッパ諸国、イラン、韓国および日本では、第二波流行が今まさに感染拡大の最中である。このうちヨーロッパ諸国およびイランでは $r_{\text{eff}} < 1.05$ に留まっており、潜在的感染者が増加しているものの、第一波流行よりも穏やかな増加にとどまり、準平衡状態で推移している。この要因は、第一波流行時の経験に基づいた感染抑制対策の効果と考えられる。対して、日本と韓国では $r_{\text{eff}} > 1.05$ となっており、突出して感染拡大が急速である。韓国では、新興宗教施設におけるクラスターの発生を起点に感染流行が一気に全国に拡散した模様である。一方、日本では、他

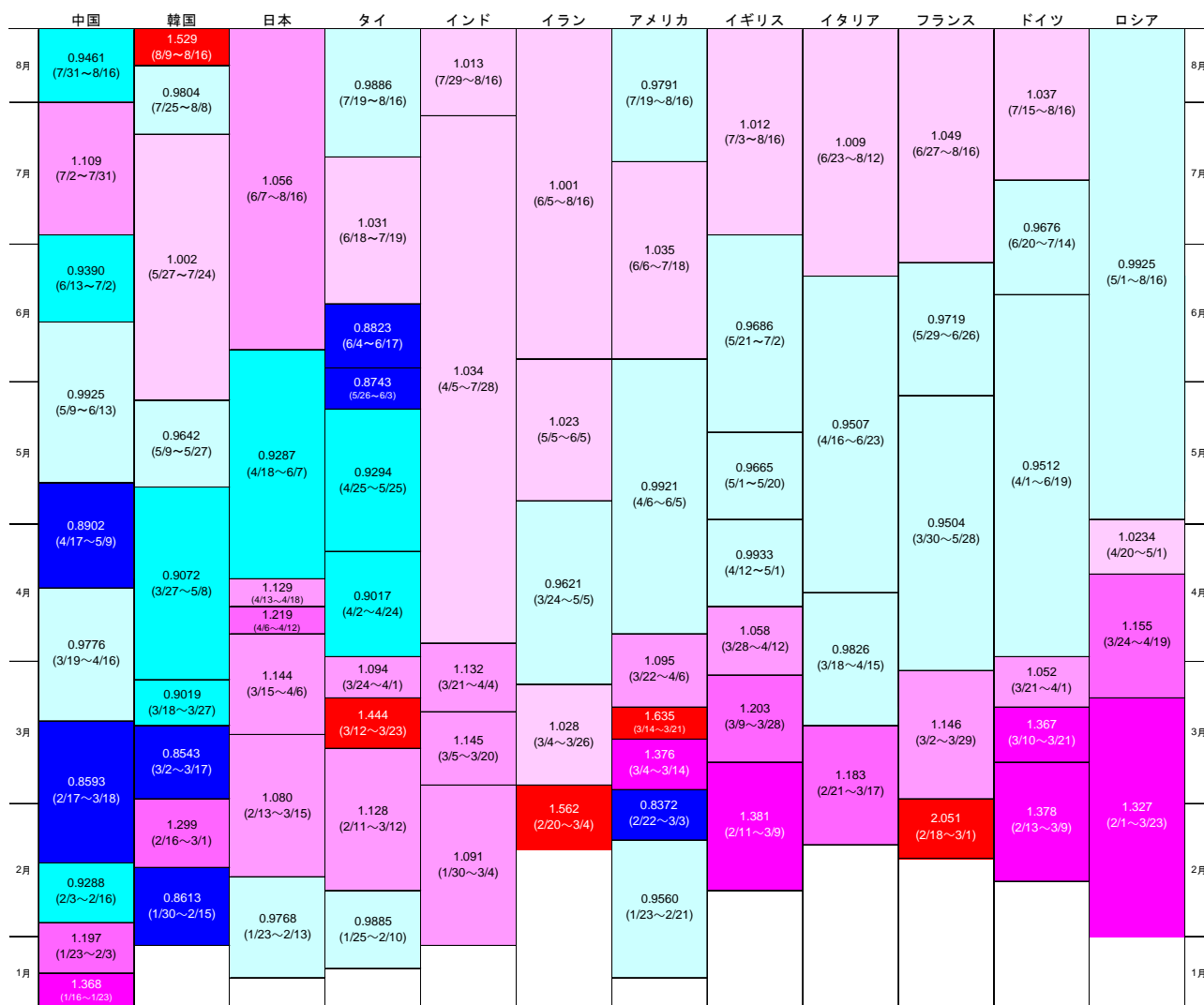


図 1 主要国における COVID-19 の感染状態の推移

表 2 主要国における COVID-19 の感染状態の定量的比較 (2020 年 8 月 16 日現在)

項目	記号	単位	中国	韓国	日本	タイ	インド	イラン	アメリカ	イギリス	イタリア	フランス	ドイツ	ロシア
評価期間			7/31~8/16	8/9~8/16	6/7~8/16	7/19~8/16	7/29~8/16	6/5~8/16	7/19~8/16	7/3~8/16	7/12~8/16	6/27~8/16	7/15~8/16	5/1~8/16
決定係数	R^2	%	99.93	99.84	99.14	98.97	99.99	99.98	99.83	99.93	99.51	99.66	99.81	99.99
日割り実効再生産数	r_{eff}	人/日	0.9461	1.5294	1.0563	0.9886	1.0134	1.0006	0.9791	1.0123	1.0304	1.0493	1.0367	0.9925
感染者検出率	k	%	34.5	計算不能	26.8	31.5	29.8	30.7	32.2	29.9	28.6	27.3	28.2	31.2
潜在感染者数	I_{res}	人	65	743	8651	29	241584	4039	121375	36723	1050	4764	6233	21222
終息閾値 (人口の1ppm)	I_{th}	人	1427	51	127	69	1352	81	327	67	60	64	83	145
終息所要日数	D_{el}	日	終息済み	計算不能	計算不能	終息済み	計算不能	計算不能	281	計算不能	計算不能	計算不能	計算不能	665
終息予定日			2020/3/4	計算不能	計算不能	2020/6/7	計算不能	計算不能	2021/5/24	計算不能	計算不能	計算不能	計算不能	2022/6/12

の先進諸国と異なって、感染者の検出隔離による感染抑制対策に消極的であることが主たる要因として挙げられる。

3.2 各国の感染流行の終息見通し

表 2 は、各国の 8 月 16 日現在の感染状態を数値

的に示している。決定係数 R^2 は、 R_{ac} 公表値と当てはめ曲線の相関係数 R の自乗値であり、パラメータ同定の信頼性を数値化している。この R^2 がいずれも 98.8% 以上の極めて高い値であることは、このモデルが各国の感染状態によく適合し、同定したパラメータの信頼性が高いことを示している。

I_{res} は、8月16日現在の潜在感染者数の推定値である。中国およびタイは $I_{res} < 100$ で極めて少なく、実質的に感染流行が終息している。しかし、他の国々では、最も少ない韓国でも743人、インドやアメリカでは10万人以上に及び、日本でも9000人近くの潜在感染者が検査を免れて市中で活動し続けていると推定される。感染の終息とは、このような自由に行動して二次感染源となり得る潜在感染者数を十分に減らすことである。

本稿では、終息判定条件を「潜在感染者が人口の1ppm(百万人に一人)未満まで減少した状態」と仮定する。表2の I_{th} は、終息判定しきい値であり、各国の人口の1ppmの人数である。中国およびタイは $I_{res} < I_{th}$ であり、終息条件を満たしていることがわかる。

潜在感染者数 $I_{res(n)}$ を式(7)のように経過日数 n に対する r_{eff} を底とした指数関数で表せるので、終息所要日数 D_{el} は、式(14)により計算できる。中国およびタイは、それぞれ3月4日および6月7日に $I_{res} < I_{th}$ となり、それを維持し続けているので「爆発的感染流行は終息した」と言えよう。

$$D_{el} = \log_{r_{eff}} \left(\frac{I_{th}}{I_{res}} \right) \quad (14)$$

実は、日本は、6月7日に $I_{res} \approx I_{th}$ まで潜在感染者を減らすことに成功している。これは、4月の緊急事態宣言に伴う接触規制を柱とした感染抑制対策の効果と言える。しかしながら、その後、検出隔離による感染抑制対策を強化しなかったために、6月7日を境に再び潜在感染者数が増加に転じ、8月16日の時点で第二波の感染流行が拡大中である。

先進国で D_{el} を計算できるのは、アメリカおよびロシアだけである。アメリカおよびロシアは、 D_{el} がそれぞれ327日および665日となり、終息予定日は来年或いは再来年となる。日本を含めた他国は、まだ第二波の感染が拡大中であり、終息日程は、予測すらできない。8月16日現在、感染を終息させたのはアジアを中心とした数カ国のみであり、南米やアフリカなどでは今も急激な感染拡大が続いている。

4. 突発的感染発現の対策法の考察

4.1 突発的感染流行のモデル化

突発的感染流行の進行は、最初の感染者が検出される前の自然な感染拡大状態(第1段階)と、突発的流行が認識された後の感染抑制状態(第2段階)の二つの過程を数式的に接続したモデルとして表せる。

図2は、COVID-19における典型的な二次感染過程を時系列に模式化している。パラメータは、感染から発症までの平均経過日数 D_i および感染源感染者と被感染者の間での発症時期の遅れの平均日数 D_d である。平均的な二次感染の発生状況は、感染源感染者が感染から D_i 日後に発熱などの発症を顕在化する一方で、感染から D_d 日後から濃厚接触者に対して二次感染を開始することになる。

COVID-19の疫学的研究は、 $D_i = 6$ 日⁶⁾および $D_d = 4.0$ 日⁷⁾と定めている。COVID-19は、平均的に、感染者が発症する感染6日後に先立つ4日目から濃厚接触者に二次感染を開始する。SARSは、 $D_i = 5$ 日⁶⁾と $D_d = 8.4$ 日⁷⁾であり、二次感染の開始が発症後であった。このため、発症者の検出隔離だけで感染流行が終息したわけである。

突発感染のモデルにおける経過日数の原点は、最初の感染者の検出日を $n=0$ と定める。COVID-19は、発症前から二次感染が始まるので、時間軸を遡る負の日数を考慮してモデル化することになる。

二次感染開始日 n_0 は、式(15)のように D_d の D_i に対する相対値として定まる。COVID-19では $D_d < D_i$ なので $n_0 = -2$ という負の値となる。

$$n_0 = D_d - D_i \quad (15)$$

n_0 が疫学的に定まる国際的に一般的な値であるにも関わらず、日本での二次感染開始日 n_{0j} は、これと異なっている。日本では、感染検査に「37.5度以上の

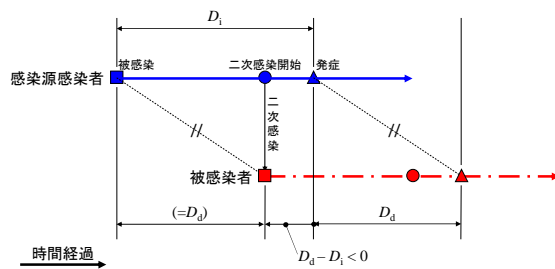


図2 感染症の二次感染過程の模式図

発熱が4日以上続く場合」という検査条件を定めていた。このような検査の待期日数 $D_p \geq 4$ 日が存在すると、 n_{0J} は、式(16)のようになる。待期中は既に発症後なので、二次感染の機会がより多くなる。

$$n_{0J} = D_d - (D_i + D_p) = n_0 - D_p \quad (16)$$

突発的感染流行は、潜在感染者数 I_{res} の推移、感染の終息所要日数 D_e および最終的な積算感染者数 R_{ac} によって評価できる。突発的感染流行は、 n_{0J} 日目に始まって D_e 日目に終息する。

式(17)は、 I_{res} の変化を表している。 I_{res} は、最初の感染者が検出される第0日目に先立つ $n < 0$ の間に感染拡大し、 $n > 0$ の間で収束していく。

$$I_{res(n)} = \begin{cases} r^{(n-n_{0J})} & [n | n_{0J} \leq n \leq 0] \\ r^{-n_{0J}} r_{eff}^n & [n | 0 \leq n \leq D_e] \end{cases} \quad (17)$$

式(18)は、 D_e の計算式である。これは、感染終息状態を「 $I_{res} \leq 1$ となって初期状態に回復した状態」と定めて、前述の式(14)と同じ考え方から定式化している。

$$D_e = n_{0J} \log_{r_{eff}} r \quad (18)$$

式(19)は、 $0 \leq n \leq D_e$ の間に検出される R_{ac} を示している。突発的感染流行のような局所的で小規模な感染流行では、すべての潜在感染者が検査対象となって遅かれ早かれ感染者として特定されることになる。したがって、突発的感染流行に伴う感染者総数は、 $R_{ac(D_e)}$ として漏らさず計数できる。

$$R_{ac(n)} = 1 + \frac{1 - r_{eff}^n}{1 - r_{eff}} \left(1 - \frac{r_{eff}}{r} \right) r^{-n_{0J}} \quad (19)$$

4.2 突発的感染流行の対策の要点

本稿では、日本を対象として具体的に突発感染の進行および終息をモデル化してみよう。第1段階の日割実効再生数 r_{eff} は、感染流行の認識前なので $k=0\%$ となり、式(5)より $r_{eff} = r = 1.4436$ と定まる。一方、第2段階では強力な抑制対策が実施されるので、図1の4月18日から6月7日の緊急事態宣言下での r_{eff} の最良値 $r_{eff} = 0.9275$ で抑え込めると考えよう。

図3は、突発的感染流行の推移を I_{res} の変化で示している。 D_p をパラメータとして4日から0日まで変え

て n_{0J} を-2日、-4日および-6日の3条件として、その影響を表している。

I_{res} は、 $n < 0$ で増加し、 $n > 0$ で減少する。 I_{res} の最大値は、 n_{0J} によって変化し、 $n_{0J} = -6$ では9人に達するが、 D_p を短縮して n_{0J} を-4、-2と短縮するとそれぞれ4人、2人と言う具合に減らすことができる。ただし、 $D_p=0$ にしても COVID-19 は $n_0=-2$ なので、感染発現時に少なくとも2人以上の感染者が市中に潜在していると考える必要がある。

D_e も n_{0J} によって変化する。 $n_{0J}=-6$ の場合、終息に30日も要することになる。しかし、 D_p を短縮し n_{0J} を短縮すれば、 D_e は、10日まで短縮できる。

図4は、 I_{res} に伴って変化する R_{ac} の変化を示している。 R_{ac} は、 n_{0J} の短縮によって減少する。突発的感染流行の感染者総数に対応する $R_{ac(D_e)}$ は、 n_{0J} の短縮によって著しく減少し、 n_{0J} が-6日、-4日、-2日と短縮するに伴って、41人、18人、6人と少なくなる。

図5は、 r_{eff} をパラメータとして最良値0.9275とそれに少し及ばない0.95の場合の I_{res} と R_{ac} の推移を比較している。 $r_{eff}=0.95$ の状況は、検出隔離が遅れている状態なので、潜在する I_{res} が増加し、結果的に終

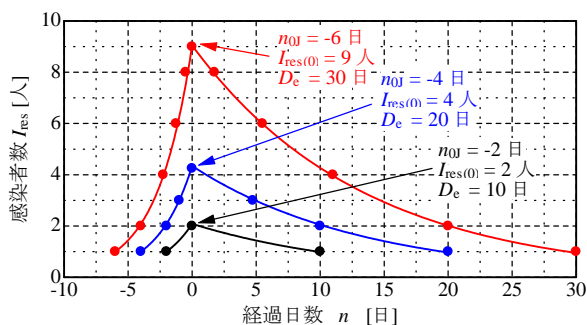


図3 突発的流行における潜在感染者数の変化

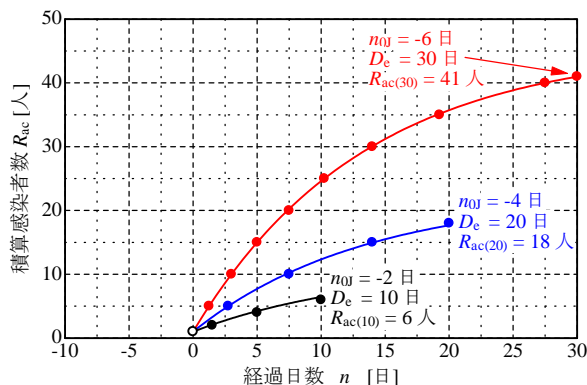


図4 突発的流行における積算感染者数の変化

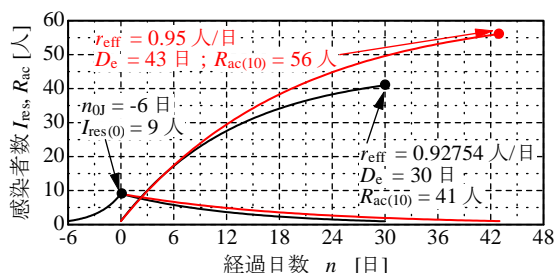


図 5 日割実効再生産数による突発的流行の変化

息を 1.5 倍近く遅らせ、感染者総数を 1.4 倍近く増加させることになる。

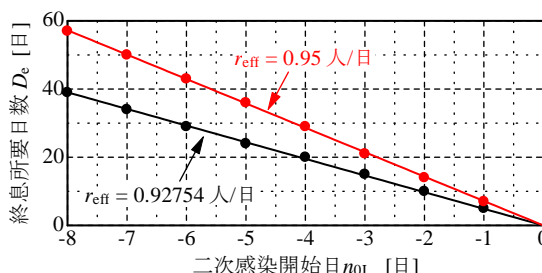
図 6 は、流行対策として変更し得るパラメータ(n_{0j} , r_{eff})が D_e および $R_{\text{ac}}(D_e)$ に及ぼす影響を示している。同図(a)に示すように、 D_e は、 r_{eff} が小さいほど短く、 n_{0j} に比例して短縮できる。一方、同図(b)に示すように、 $R_{\text{ac}}(D_e)$ も r_{eff} が小さいほど少なくて済むが、 $|n_{0j}|$ の増加に対しては比例する以上に急増することになる。

以上より、突発的感染流行は、 $|n_{0j}|$ および r_{eff} を低減すれば小規模に抑え込める。特に、 $D_p=0$ として $n_{0j}=n_0$ 、すなわち世界の標準に合わせれば、突発的感染流行の規模を確実に縮小できる。一方、 r_{eff} は、定義式(5)に基づいて k を高めることが効果的である。具体的には、感染検査を促進すれば k が増大し、突発的感染流行の規模は小さく抑え込めることになる。

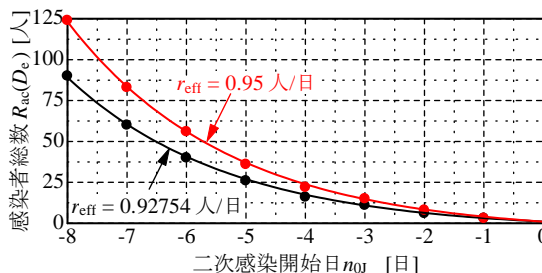
4.3 感染規模縮小のための社会的対応への提言

COVID-19 は、発症前の潜伏期間中から二次感染を開始するため、突発的感染流行の発生を完全に防止することはできない。したがって、突発的感染流行の対策は、発生後に感染規模を小さく抑えることであり、具体的には、第一に感染発現のできるだけ早い特定、第二に感染者の検出隔離による拡大防止の二点となる。感染の拡大防止体制が整っていれば突発的感染の発現は恐れる必要が無く、社会活動や経済活動は、通常に戻して良いはずである。

しかしながら、COVID-19 が潜伏期間中に二次感染を開始するため、いかなる個人も知らぬ間に感染するリスクに曝されている。突発的感染流行の感染規



(a) 終息所要日数の変化



(b) 感染者総数の変化

図 6 抑制対策による感染流行の結果の変化

模を抑制のため、ポスト・コロナ時代の社会は、感染者を患者にせず、いかなる過程で感染したかを問わずに許容する寛容さを共有すべきである。そのような社会の寛容さは、感染者が感染規模縮小のための対策に協力しやすい雰囲気醸成し、濃厚接触者や感染者を特定し易くすると期待できる。

COVID-19 の遺伝子継承戦略は、個人行動の規制や監視のような強制力で抑え込めるものではない。予測不能な突発的感染流行の発現に対処できる社会とは、規律や管理を強制する“厳しい社会”ではなく、むしろ寛容に感染を受容することで感染規模を縮小できる“優しい社会”であろう。人類は、COVID-19 という新興感染症に直面して、改めて新しい社会の在り方を問われているのではないだろうか。

5. おわりに

前報以来、新興感染症における検出隔離による抑制対策を考慮した新たな数理モデルを提案している。提案モデルは、COVID-19 のパンデミックに適用され、第一波の感染流行の終息に引き続いて、世界的に第二波の感染流行が始まっていることを明らかにした。COVID-19 は、発症前の潜伏期間中から二次感染が始まるため、突発的感染流行は不可避であり、その

対策として、徹底した検出隔離が必要不可欠であることを示した。COVID-19 が潜伏期間中に二次感染を開始することは、誰もが感染者になる潜在的リスクに曝されていることを意味しており、ポスト・コロナ時代の社会に対して、感染者を寛容に受容することによって感染拡大を社会全体で抑制する“優しい社会”への変容を求めていると考えるべきであろう。

参考文献

- 1) WHO: Coronavirus disease (COVID-19) weekly epidemiological update, 2020.10.5
- 2) 坂本治久, 氏家 弘: 検出隔離による対策下の新興感染症の感染流行のモデル化(第 1 報) — COVID-19 の感染流行の評価のための新しいモデルの提案 —, 金属, 第??巻, 10 月号, 2020 年.
- 3) M. Small, P. Shi and C. K. Tse: Plausible models for propagation of the SARS associate coronavirus. *IE-ICE Trans. on Fund. of Elec. Com. and Comp. Sci.* e87-A(9), 2004, pp.2379–2386.
- 4) T. Liu, J. Hu, M. Kang, et al.: Transmission dynamics of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV). *bioRxiv.* 2020, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.01.25.919787>.

- 5) WHO: Coronavirus disease (COVID-2019) situation reports. No.1 to No.209, 2020.
- 6) WHO: Coronavirus disease 2019 (COVID-19) Situation Report, No. 73, 2020.4.2.
- 7) H. Nishiuraa, N. M. Lintona, A. R. Akhmetzhanova: Serial interval of novel coronavirus (COVID-19) infections, *Int. J. of Infectious Diseases*, 93 (2020), 284–286.

執筆者略歴

坂本治久(さかもとはるひさ/Sakamoto Haruhisa)
1990 千葉大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年 (株)日立製作所入社, 1995 退職。同年 上智大学理工学部機械工学科(現 機能創造理工学科)助手, 専任講師, 准教授を経て, 2012 教授, 2017 退職。現在 氏家脳神経外科内科クリニック付属医学研究所研究員。2003 博士(工学)。専門: 精密工学, 医療工学, 数理工学。

氏家弘(うじいえひろし/Ujiie Hiroshi)
1978 岩手医科大学医学部卒業。同年 東京女子医科大学脳神経外科入局, 2004 助教授。2009 東京労災病院脳神経外科部長, 2017 退職。現在 氏家脳神経外科内科クリニック院長。1978 医師免許証取得, 1985 脳神経外科専門医, 1988 医学博士, 2004 脳卒中専門医。専門: 脳神経外科学, 医工連携。