

新型コロナウイルスの蔓延に関する一考察

科学教育総合研究所 小田垣 孝
(第1稿 2020.5.8)(改訂第5稿 2020.6.22)

隔離される感染者数を変数として取り込めるように従来の感染症の SIR モデルを改良し、新型コロナウイルスの蔓延初期の感染の特徴を分析する。隔離率を見積もれば、日ごと隔離者数から市中感染者数を推定できること、および隔離率を増大することにより蔓延を効果的に収束させられることを示す。

1 はじめに

昨年 12 月に中国で発生した新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) は世界中に蔓延し、感染者数は 5 月 14 日現在世界で 430 万人以上、日本でも 1 万 6 千人以上となっている。世界中で懸命な対応が行われ、日本でも全国的な緊急事態宣言の下、厚生労働省の予測に基づき、人と人との接触を 8 割減少させることが求められている。

従来、インフルエンザなどの感染症の流行の様子は、未感染者(S)、感染者(I)、除去者(隔離者+快復者+死者)(R)を考えた SIR モデル[1]で説明されており、新型コロナウイルスの流行についても SIR モデルで理解できると、科学 5 月号の牧野の解説記事[2]で述べられている。SIR モデルによると、感染者数や新規感染者数は、実効再生産数が 1 より大きいか小さいかによって、指数関数的に増加するか、減少する。一方、日本の 4 月中旬の 1 週間の日ごとの PCR 検査陽性者数を見ると、全国で 400-600 人/日、東京では 100-200 人/日で変化が小さいように見える。これは、SIR モデルでは実効再生産数がちょうど 1 くらいになっていることを意味するが、何故そのようなつり合いが成り立っているのだろうか。また、SIR モデルでは隔離された感染者も市中の感染者も治癒あるいは感染力がなくなるまでの時間が同じとして扱われており、SIR モデルは現状を正しく表していないと思われる。

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) は、政令第十一号(令和 2 年 1 月 28 日)により指定感染症として定められ、感染者は隔離されることになっている。感染者数が急激に増えており、重症者のためのベッドを確保するために、軽症あるいは無症状の感染者はホテルなど別の施設で隔離されるようになっている。それでも隔離された感染者は、原則的には未感染者との濃厚な接触はなくなり、他の人に感染させないはずである。

本小論では、感染者には、隔離された隔離感染者と、未検出のまま市中に留まっている市中感染者がいることを考慮して SIR モデルを改良し(SIQR モデルとよぶ)、そのモデルに基づいて流行の現状の分析と流行を押さえるための対策について考察する。

2 SIQR モデル

新型コロナウイルスによる感染は、(1) 潜伏期間が長いこと、(2) 無症状者がいること、(3) 市中感染者の減少に寄与するのは、市中感染者の感染力保持期間(ウイルスを感染させなくなるまでの期間)を短くすることであり、隔離者の治癒ではないこと、(4) 観測される量は、日々隔離される人の数(日ごと陽性者数)、累計感染者数、PCR 検査陽性率、PCR 検査数と PCR 検査の精度、退院数、重症化率等限られていること という特徴を持つ。従って、これらの中で最も重要と考えられる観測量を見いだして(市中)感染者数と関係づけるための、モデルの構築が必要となる。

これまでの感染症の場合は、通常潜伏期間を経て発症し、発症した感染者は隔離されることになる。このような感染症に対するモデルとして、潜伏期間中の感染者(**E**xposed)を考えた、SEIR モデル[3] が知られている。新型コロナウイルスの場合、潜伏期間が長いという特徴があり、これまでの感染症のように発症して隔離される場合もあるが、まったく発症せずに、接触者に感染させ、無症状のままウイルスをある期間(感染力保持期間)保持し、快復する例があると報告されている。一方、隔離された感染者は、原則的には未感染者にウイルスを感染させることはなく、また治癒するまでの時間は、薬の投与などで短縮できる場合もある。さらに、日ごと陽性者の数は、データの集約に問題があるようだが、特徴のある時間変化を示している。政策によって変えることができるのは、都市封鎖などによる人と人の接触頻度、PCR 検査による陽性者の発見と隔離および薬の開発による隔離されている感染者の治癒率の向上である。

ここでは、これらの政策依存の効果をあからさまに扱えるように、通常の SIR モデルでは除去者に含まれている隔離者を隔離感染者として独立な変数として扱う。そこで全人口(N)を、未感染者 (S : Susceptible)、市中感染者 (I : Infected-at-large)、隔離感染者 (Q : Quarantined) と快復者(+死者) (R : Recovered) に分ける。隔離感染者(自宅、病院での隔離を含む)の日ごとに増加する量が、PCR 検査によって陽性が確認され、隔離された人の数になる。未感染者に感染させるのは市中感染者だけ(隔離された感染者からの感染も見られるがここでは無視する)であるから、それぞれのカテゴリーの人数の時間発展は、

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = (1 - q')\beta SI - qI - \gamma I \quad (2)$$

$$\frac{dQ}{dt} = q'\beta SI + qI - \gamma'Q \quad (3)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I + \gamma'Q \quad (4)$$

で表わすことができる。ここで、各項の意味を説明しておく。 β は未感染者と感染者の接触による感染係数であり、 βSI は未感染者と感染者の接触により単位時間に生じる新規感染者の数を表す。その数だけ未感染者から減り、その一部 $(1 - q')\beta SI$ が市中感染者、残り $q'\beta SI$ が隔離感染者になることを表している。つまり、 q' は新規感染者の中で、陽性が確認され、隔離された人の

割合である。 qI は市中感染者の中で感染が確認された人の数であり、その人数は単位時間の間に市中感染者から隔離感染者になる。 q は隔離率を表す。 γ' は隔離感染者の治癒(+死亡)率であり、一人の患者が発症後治癒するまでの日数の逆数である。医療関係者の努力や治療薬の開発はこの γ' を大きくすることにある。 γ は市中感染者の治癒率であり、感染後自然に感染力を持たなくなるまでの日数(感染力保持期間)の逆数である。無症状者は、通常治療できないので、その感染力保持期間を人為的に変化させることは難しい。なお、この連立微分方程式(1)~(4)は、人口の保存則 $S + I + Q + R = N$ (一定)を満たしている。

ここでは、感染初期で感染者や隔離された人、快復された人の数が人口より十分小さく $I + Q + R \ll N$ が成立し、 $S = N$ と近似できる感染の初期のみを考えることにする。また、潜伏期間が2週間ほどと言われているので、感染直後の感染者が隔離されることはないから、 $q' = 0$ とする。このとき、感染者数の満たす微分方程式は

$$\frac{dI}{dt} = \beta NI - qI - \gamma I \equiv \lambda I \quad (5)$$

$$\frac{dQ}{dt} = qI - \gamma' Q \quad (6)$$

となる。ただし、 λ は

$$\lambda = \beta N - q - \gamma \quad (7)$$

であり、感染者数の増減率を決定する量である。(1)、(4)式はそのままである。後に見るように、パンデミック収束のための議論において、本質的な役割をするのは(5)式であり、SIRのものと同じ形をしている。重要な相違は、(5)式右辺の γ が市中感染者の感染力保持期間の逆数であり、隔離されている感染者の治癒時間の逆数 γ' ではないこと、および隔離率を導入していることである。

この簡略化した式では、(5)、(6)式右辺の qI が、日々発表される日ごとPCR検査陽性者数であり、この量はおおよそ潜伏期間ほど前の市中感染者数を反映しているという感染症の専門家の指摘がある。これらの式を用いて、流行の現状を分析し、有効な対策を考察する。このモデルは、都市ごとの取り組みの違いや感染者の履歴、例えば感染後何日目くらいから感染力が大きくなるなどを無視し、平均的な振る舞いのみを記述するものであることを注意しておく。また、以下で示す数値は、大変大雑把な推測に基づくものであり、精度の高い分析や予測ではないことを断っておく。

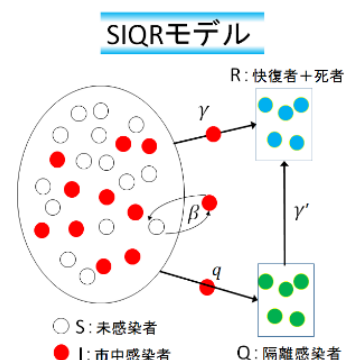


図1 感染症のSIQRモデル。未感染者は、感染者と接触して β の割合で感染者となる。

3 感染拡大の様子

3.1 日ごと陽性者数と市中感染者数

新型コロナウイルスの問題で、毎日報告される重要な観測量は、日ごと陽性者数、すなわち新規感染者数=隔離者数であり、それを $\Delta Q(t)$ とする。検体の採取後の時間が不揃いなど、データの報告の仕方に問題があるようだが、ここで導入したモデルの範囲では、その日に何人隔離され、それが全体の市中感染者の何倍になっているかということだけが問題となる。このモデルでは、(5)式のように $\Delta Q(t) = qI(t)$ と表している。すなわち、

$$I(t) = \frac{\Delta Q(t)}{q} = \frac{\Delta Q(t)}{\beta N - \gamma - \lambda} \quad (8)$$

の関係があることが分かる。従って、 λ 、 βN 、 γ の値が分かれば、日ごと陽性者数から市中感染者数を推定することができる。特に、4月中旬のように日ごと陽性者数、従って市中感染者数がほぼ一定と思われる期間では $\lambda = 0$ であり、 $I(t) = \Delta Q(t)/(\beta N - \gamma)$ となる。牧野[2]の推定値 $\beta N = 0.07$ 、 $\gamma = 0.04$ を用いると、日ごと陽性者数のおよそ $100/3 = 33$ 倍が市中感染者数となる。次節のデータフィッティングから得られる値 $q = 0.096$ を用いると、 $I(t) = 10.4\Delta Q(t)$ となり、その頃の全国の感染者数はおよそ 5000 人、東京都でおよそ 1500 人と推定できる

3.2 日ごと陽性者数の変化の考察

(5),(6) 式は、パラメータが時間に依存しなければ直ちに解くことができ、

$$I(t) = I(t_0)e^{\lambda(t-t_0)} \quad (9)$$

$$Q(t) = Q(t_0)e^{-\gamma'(t-t_0)} + I(t_0)\frac{q}{\lambda+\gamma'}(e^{\lambda(t-t_0)} - e^{-\gamma'(t-t_0)}) \quad (10)$$

を得る。ただし、 $I(t_0)$ 、 $Q(t_0)$ は、時刻 t_0 における I と Q の値である。期間ごとにパラメータの値が変化するので、これらの式を全期間にそのまま適用することはできないが、これらの式を期間ごとに考えて、日本で何が起きているのかを分析してみる。なお、(10)式は、隔離感染者数の時間変化を表す式であるが、ここで考察するパンデミックに対する対策の考察には主要な働きをしないので、以下の議論は(9)式に基づいて行う。COVID-19 の感染拡大/縮小を論ずる場合、主要な働きをする変数は、市中感染者数 $I(t)$ 、日ごと陽性者数 $\Delta Q(t)$ および、増減率 λ を決める三つのパラメータ βN 、 q 、 γ である。

感染者数が感染初期にどのような経過を辿るのかを考える。感染が始まった頃は、発症者ではなく PCR 検査もされないので、 $q = 0$ であり、また快復することもないので、 $\gamma = 0$ としてよい。従って $I(t) = I(0)e^{\beta N t}$ のように、市中感染者数は指数関数的に増加する、すなわち倍加時間 $0.693/(\beta N)$ ごとに 2 倍になっていく。一月くらい経つと、ある割合で快復する人が出始めるので、増加率はやや減少して $I(t) = I(t_0)e^{(\beta N - \gamma)(t-t_0)}$ のように振る舞う。市中の感染者の数が増えると、ある割合で発症者が現れ、さらにその重症化率倍した数の重症者が現れる。その過程のいずれかの時点で、PCR 検査陽性者の隔離が実施されるようになり、市中感染者数は $I(t) = I(t_0)e^{(\beta N - \gamma - q)(t-t_0)}$ のように変化する。さらに感染者が増加すると、隔離率(q) を上げ、さらに行動制限を強いて感染率 (β) を小さくし、極端な場合は都市封鎖によって β を限りなくゼロに

近づけて、市中感染者数を減少させる政策がとられる。このように各期間において、市中感染者数は何らかの指数関数で表すことができる。

様々なパラメータを推測するために、日ごと陽性者数に着目する。感染症の専門家の指摘によれば、ある時点の市中感染者数に比例して新規感染者が生じるから、およそ潜伏期間の2週間後

新型コロナウイルス感染症の国内発生動向

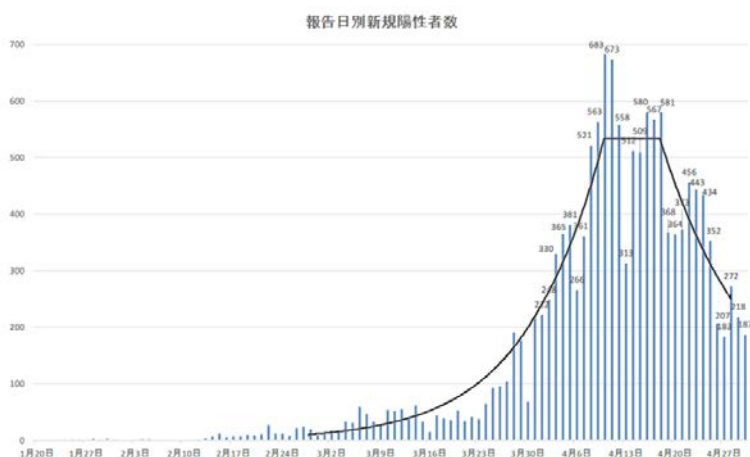


図2 日本全国の日ごと陽性者数の変化を4つの区間毎に指数関数フィットしたもの。データは、厚生労働省発表のもの。

の日ごと陽性者数になっている。この対応関係が正しいとすれば、日ごと陽性者数の時間変化は、同じ政策が採られている期間ごとに異なった指数関数で表せることになる。SIQRモデルには、遅れの効果や感染者の履歴は全く考慮に入られていないこと、また潜伏期間は人によって異なることも考慮していないことから、ここでのパラメータの見積もりは非常に大雑把なものに過ぎないことを強調しておく。

日本全国の3月、4月の日ごと陽性者数(隔離数)を目視により4つの期間(表1に示す)に分け、2月29日において $\Delta Q = 10$ として、期間毎に指数関数でフィットしたものを、図2に示す。公表されているデータは、様々な要因でばらつきがあるので、フィッティングも目視による大雑把なものに過ぎないことを断っておく。

フィッティングで求めた λ の値から、 βN 、 γ 、 q の値を見積もることができる。まず市中感染者の治癒率はほぼ一定と考えられ、感染力を失うまでの日数を33日として $\gamma = 0.03$ を仮定する。次に、感染症が現れた初期は、市中感染者の中で隔離される人はごく少ないと考えられるので、最初の期間では $q = 0$ と近似する。第2期の λ の減少は、厳しい制限の下での隔離が始まったこと(q の小さな増加)、第3期のそれは本格的な隔離によるもの(q の増加)と仮定した。さらに、感染率は最後の期間を除いて一定、隔離率は後の2期間では一定と見なす。このような考察に基づき、各区間で決めたパラメータの値を表1にまとめる。

基本再生産数を、 $R_0 = \beta N / (q + \gamma)$ で定義すると、第1~4期でそれぞれ、4.2, 3.5, 1, 0.4となる。第1、2期の基本再生産数は、専門家会議の用いる値よりは少し大きい、データのフィ

表1 推定されたパラメータの値。 λ はフィッティングで得た値、() 付きは他のデータからの推測値、下線付きは先の期間の値をそのまま使ったもの。

期 間	3.1~4.2	4.2~4.11	4.11~4.19	4.19~4.29
(2 週前)	2.16~3.19	3.19~3.28	3.28~4.5	4.5~4.15
λ	0.096	0.090	0.0	-0.075
βN	0.126	<u>0.126</u>	<u>0.126</u>	0.051
q	(0)	0.006	0.096	<u>0.096</u>
γ	(0.03)	(0.03)	(0.03)	(0.03)

フィッティングによる違いと考えられる。

感染率 βN は、最初 0.126 であったものが、緊急事態宣言後の第 4 期には 0.051 と小さくなっており、市民の外出自粛の努力により、約 60%の接触減になっていると解釈できる。

各期間のフィッティングに用いる関数により、これらの推定値は少し異なる。特に第 3 期は、減少率の小さい指数関数でもフィットできるが、少なくともこの期間は、PCR の検査がある程度増加し、微妙なバランスにより λ の値がゼロ近くになっていると解釈できる。より精度の高い分析は、より精度の高いデータが報告されてからの課題である。

3.3 如何にコントロールするか

次に、感染者を減らす対策について考えてみよう。このモデルの範囲で理解すると、5月2日の時点で、およそ 3000 人の市中感染者がいると推測できる。(9) 式は、 λ が負の値のとき、 $1/|\lambda|$ 日程度で、市中感染者数がおおよそ 1/3 になることを意味している。従って、現在の市中感染者数を減らすには、(7) 式の λ の値をできるだけ大きな負の値にすること、すなわち βN を小さくし、 q と γ を大きくすれば良いことになる。感染率 βN は、感染者と未感染者の接触およびウイルスの感染力で決まる量であり、市民の外出自粛によって接触機会を減らすことやワクチン接種で小さくできる。隔離感染者の治癒率 γ' は、薬の開発や医療の対応で大きくなるが、市中感染者の γ を大きくする効果は望めない。政府や自治体の対策によって変えることができるのは、隔離率 q である。

それぞれの対策の効果を比較するために、行動自粛率を x とし、隔離率を y 倍増加させる対策（検査方法を工夫して）を取ったときに、どのように感染者が減少するかを比較してみる。この対策の下での減少率 $\lambda(x,y)$ を

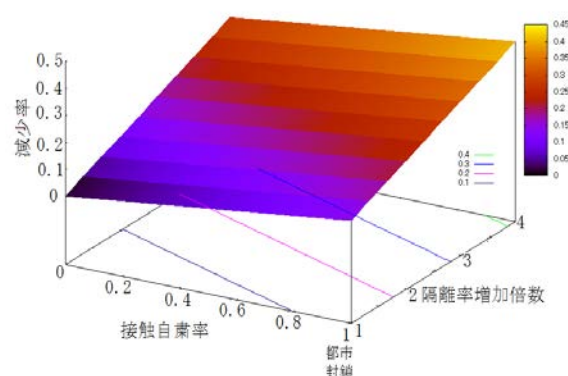


図3 減少率(11)の接触自粛率、隔離率増加倍数依存性。表1の第3期の値を用いた場合。

$$\lambda(x, y) = |(1 - x)\beta N - yq - \gamma| \quad (11)$$

で定義する。上で得た表 1 の第 3 期のパラメータの値を用いると、 $\lambda(x, y)$ は図 3 に示すような x, y 依存性をもつ。市中感染者数の減少率は、接触自粛率よりも隔離率増加倍数に強く依存していることが分かる。

表 2 いくつかの対策の比較。市中感染者のウイルス保持期間を 33 日とした場合。この期間を 15 日とすると、(3)、(4)の場合の 1/10 になる日数は、それぞれ 13 日、18 日となる。

対 策	x	y	$\lambda(x, y)$	1/10 になるまでの日数
(0) 表 1 第 4 期	0.6	1	0.075	31
(1) 8 割自粛	0.8	1	0.101	23
(2) 都市封鎖	1.0	1	0.126	18
(3) 隔離率 4 倍増	0	4	0.288	8
(4) 隔離率 2 倍増 と 5 割自粛	0.5	2	0.159	14

現在世界中で、都市封鎖を含む様々な対策が採られている。典型的な対策に対して具体的に市中感染者の減少率を求め、市中感染者数が 1/10 になるまでの日数 T を比較したものを表 2 に示す。また、市中感染者の変化の様子を図 4 に示す。

パラメータの設定に用いた関係が正しければ、日ごと新規感染者数も同じ指数関数で表されることになる。従って、この図の原点を、4 月 5 日にずらして考えると、それ以後 1 ヶ月間の日ごと陽性者数の振る舞いと見なすことができる。(0)は、第 1 図の第 4 期のフィッティング曲線と同一である。すなわち、実測された日ごと陽性者数の変化である。(1) ~ (4) は、4 月の時点で、別の対策を採っていた場合に、予想される新規感染者の推移と見なすことができる。明らかに感染者を隔離する対策が最も有効であることが分かる。このことは、既に多くの専門家が指摘しているところである。

もちろん全員検査は物理的にも、時間的にも、極めて難しいであろうが、「発熱後 4 日間待って検査する」という当時の方針を改め、発熱、咳・痰、味覚障害、倦怠感など感染症の兆候が一つでも出た人（できればその接触者全員を含めて）は、即日 PCR 検査を行い、陽性者の（ホテル・自宅での隔離を含めた）隔離を行うことが有効であったと考えられる。図 4 の曲線 (4) で示した

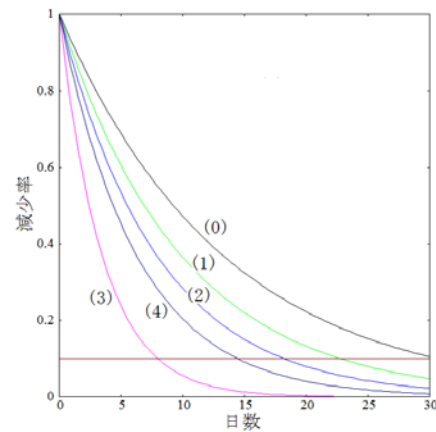


図 4 いくつかの対策による市中感染者数の減少の様子の比較。(0) 表 1 第 4 期、(1) 接触 8 割自粛、(2) 都市封鎖、(3) 隔離率 4 倍増、(4) 隔離率 2 倍増と接触 5 割自粛。日ごと陽性者数も同じ振る舞いをすると考えられる。

ように、隔離率を2倍に増やし、接触自粛を5割程度にするだけで、都市封鎖(2)より効果的であることが分かる。

隔離数を増やすと、医療関係者や行政の担当者、隔離される人とその家族は大変であろうが、すでにいくつかの自治体が行っているように、うまく機能する隔離の仕組みを導入し、市中感染者の隔離の効率を上げるためにPCR検査あるいは抗原検査を増やすべきである。

4 考察

まず、隔離の効果についての考察から始める。重要な基本方程式は、(5)式であり、これまでのSIRモデルと同じ形をしている。これまでは、通常(5)式右辺の最後の2項がまとめて考えられ、隔離は重症者を病院で早く手当てする手段と考えられているようである。現場の医師から、隔離を増やすと、医療崩壊を招くと悲痛な訴えがなされていた。この考えに立てば、感染を収束させるには、(5)式右辺の第1項の新規感染者を減らすしかなく、行動自粛が唯一の政策と言うことになる。しかし、これまで法定伝染病の場合、隔離は感染者を市中から除くために行われていたし、インフルエンザの場合4日間自宅待機(隔離)が求められている。つまり、隔離は、感染者の増える割合を(5)式の右辺1, 2項と考えて、 $(\beta N - q)I$ を減らす手段になっていた。このように考えると、何故検査を増やして、できるだけ多くの感染者を隔離することが効果的なのかを理解することができる。表1の第3期では $(\beta N - q)$ の βN と q は、やや前者が大きいがおおよそ同じ程度である。8割の行動自粛は、 βN を $0.2\beta N$ にすることであり、感染者減少率におおよそ0.1小さくする寄与をする。一方、隔離を2倍にすると q が2倍なり、おおよそ0.1小さくする寄与がある、すなわち、日本の場合、行動自粛8割と同じ効果を持っていたはずである。 q を増しても医療崩壊を起こさない体制があれば、隔離を4倍にすることによって、さらに効果的にパンデミックを収束に向かわせる効果が期待できることになる。

隔離の効果を分かり易くするためには、有効再生産数 R_e を1日の市中感染者の増えた数(新規感染者数と隔離感染者の差)と快復した人の数との比で定義する：

$$R_e = \frac{\beta N - q}{\gamma} = 1 + \frac{\lambda}{\gamma} \quad (12)$$

すなわち、 $R_e=1$ のときは、単位時間内に市中に増加する新規感染者と感染力をなくす市中感染者の数が同じになって、一定数の市中感染者が存在し続けることになる。感染の拡大期では R_e は1より大きくなり、縮小期には1より小さくなる。望ましいのは、新規感染者数以上の隔離を行って、 R_e を負にすることである。表1のデータについて R_e を求めると、第1期から順に、4.2、4.0、1、-1.5になっている。

パンデミック対策の基本となるのは、(1)新規感染者ができるだけ出ないようにすること及び(2)市中の感染者をできるだけ速やかに減少させることである。(1)の対策としては、都市封鎖や外出自粛であり、現在の日本の対策の中心である。感染者の隔離は(2)のための対策であり、その効果的な実施体制の確立は政府の責任になろう。(1)の対策を取らないと、市中の感染者がどんどん増え、その数を上回る隔離が必要になって、隔離体制そのものの崩壊や医療崩壊が起こることが危惧されるだけでなく、それによる経済的損失が(1)の対策による損失を越えることもありうる。ここで示したことは、パラメータの正しい値を推定し、その値に対応した図3、

図 4 を用いて、市民生活と経済に対する二つの対策をバランス良く採用すれば、COVID-19 を収束させる最適な方法が見つけられるということである。

次に、モデルの妥当性の検証の一つとして、隔離率 q と感染者が発症する割合、発症率との関係を見ておく。このパラメータ q は、発症率×検査率×その他の因子 で与えられる。一人の人が発症した時、現在の日本の方針では 4 日間待ってからの検査になるから、1 日あたりの検査率(1 日に検査される人の数/1 日に発症する人の数)は 0.25 程度と考えることができる。前節で得た $q = 0.096$ を用いると、その他の因子が 1 として、発症率はおよそ 38%となる。その他の因子としては、様々な効果が考えられる。隔離率を下げる因子として、PCR 検査キットの精度、多くの人が長く待たされることが上げられる。隔離率を上げる効果としては、発症者に対して周囲の接触者も同時に検査することが上げられる。これらの因子を含めた有効検査率の推定は難しい。直感的には有効検査率は 2~3 倍程度大きく、従って発症率はおよそ 0.1~0.2 と予想している。現在、発症率として色々な数値が示唆されているが、この値に近い報告もある。

表 1 の第 4 期以後 5 月初旬までの新規感染者の変化は、第 4 期のフィッティングに用いた指数関数にほぼ乗っていることが確認でき、上記の分析に矛盾はないと考えられる。

2 月から 4 月にかけての政府の方針は、公式的には医療崩壊を防ぐために PCR 検査数を極力減らすというものであった。これは、結果として市中に有症状感染者を残したことになり、さらにその人から感染した市中感染者を増加させたと思わざるを得ない。この方針は (7) 式の q を小さくし、 λ が大きくしたことになる。

感染係数を小さくするために行われている人と人との接触頻度を下げる対策は、市民に極めて大きな影響を与え、さらに経済を少なからず減退させており、ひとえに市民生活と経済を犠牲にするものである。一方、隔離率を上げるために、効率的な検査体制と隔離の仕組みを構築することは政府の責任である。政府が、「接触 8 割減実現」のみを主張するのは、責任放棄に等しい。幸い、多くの自治体が独自の取り組みで、検査-隔離体制を築きつつあるのは、新型コロナウイルスの蔓延を終息に向かわせるための大きな前進と言えよう。

新型コロナウイルス感染症は、潜伏期間が長く、また無症状感染者が感染させるというこれまでにない感染症であり、韓国、台湾やベトナムで行われたように感染者を徹底的に隔離する以外に有効な対策はないと思われる。これはまた、古より培われてきた知恵でもある。

快復者(自然免疫を持っている人)が増加すれば、集団免疫によって感染が終息に向かうが、その効果は、本考察で仮定した近似 $S = N$ を用いないことで取り入れることができる。未感染者が減少して、感染が終息に向かうのは数ヶ月から 1 年先のことである。この対策を採った場合、自然免疫を持つ人が増えるのを待つ間に、数 100 万人の感染者と数万人の死者が出ると予想されており、スウェーデンが採用しているこの方法は到底受け入れられないであろう。

最後に、最近テレビでよく聞く PCR 検査の陽性率について触れておく。陽性率を考える場合、検査対象となった母集団によってその意味合いが異なることに注意する必要がある。検査対象が無作為抽出された市民であれば、陽性率を市中感染率の尺度として用いることができる。しかし日本の場合、主として濃厚接触者や感染が強く疑われる者のみを対象として検査が行われており、陽性率は「その方々の接触の濃厚度」を表す尺度と考えるべきである。隔離対象者を市民の中から

ら効率よく見つけて検査すれば、必然的に陽性率は高くなる。

本考察をまとめた後、**SIQR** モデル [4] や潜伏期間を含めた **SEIQR** モデル[5]が既に提案されていたことが分かった。しかし、これらの論文では、検査による隔離や日ごと陽性者数の概念は導入されていない。

謝辞

議論して頂いた松下貢、佐野雅己、山崎義弘、藤江遼各氏に感謝いたします。また本論文のプレプリントに対して、多くの貴重な意見を寄せて頂いた方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] W. O. Kermack and A. G. McKendrick, Proc. Roy. Soc. A **115** (1927) 700.
- [2] 牧野淳一郎、科学 (岩波書店) **90** (2020) 428.
- [3] R. M. Anderson and R. M. May, Science **115** (1982) 1053.
- [4] H. Hethcote, M. Zhien and L. Shengbing, Math. Biosci. **180** (2002) 141.
- [5] W. Jumpen, B. Wiwatanapataphee, Y. H. Wu and I. M. Tang, Int. J. Pure & Appl. Math. **52** (2009) 247.