

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

感染者を隔離する過程を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。日ごと隔離者数が横ばいの場合、市中感染者数はおよそその 10 倍であること、および隔離率を増大することにより効果的に蔓延を終息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 2 日現在世界で 330 万人以上、日本でも 1 万 4 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)、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、基本再生産数が 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 2 週間 (4 月 10 日~24 日) 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/日で推移している。これは、SIR モデルでは基本再生産数がちょうど 1 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であろうか。また、SIR モデルでは隔離された感染者も市中に感染を広げることになっており、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、感染者に隔離された感染者と、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

通常の SIR モデルを変形し、全人口(N)を未感染者(S)、感染者、快復者(+死者)(R)に分類し、

さらに感染者を PCR 検査によって陽性が確認され隔離された感染者(Q)と検査されずに市中にいる感染者(I)に分ける。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、

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

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

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

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

で表わすことができる。ここで、 β は未感染者と感染者の接触による感染係数、 γ は感染者の治癒率で、簡単のために市中感染者も隔離感染者も同じ治癒率であるとした。 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り、 p は市中感染者の中で感染が確認され、隔離された人の割合(隔離率)を表す。また、この連立微分方程式は、人口の保存則 $S + I + Q + R = N$ (一定)を満たしている。図 1 に、モデルの模式図を示す。

ここでは、 $I + Q + R \ll N$ 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

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

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

となる。ただし、 λ は

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

であり、感染者数の増減率を決定する量である。この簡略化した式では、(6)式右辺の pI が、日々発表される日ごと PCR 検査陽性者数 (ΔQ で表す) 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。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。

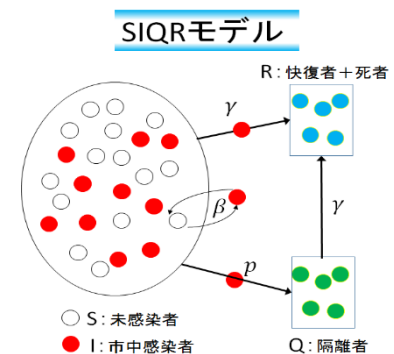


図 1 感染症の SIQR モデル

3 感染拡大の様子

3.1 市中感染者数と日ごと陽性者数

(5) 式から直ちに、市中感染者数 I と日ごと陽性者数 $\Delta Q(t)$ の間には

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

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[1]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トから得られる値 $p = 0.096$ 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、

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

$$Q(t) = Q(t_0)e^{-\gamma(t-t_0)} + I(t_0)\frac{p}{\lambda+\gamma}(e^{\lambda(t-t_0)} - e^{-\gamma(t-t_0)}) \quad (10)$$

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。

感染が始まった頃は、発症者はなく PCR 検査もされないので、 $p = 0$ 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、すなわち一定の倍加時間ごとに倍、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政府により、PCR 検査とその陽性者の隔離が実施されるようになり、市中感染者数は $I(t) = I(t_0)e^{(\beta N - \gamma - p)(t-t_0)}$ のように変化する。さらに感染者が増加すると、PCR 検査を増やして隔離率を上げ、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、何らかの指数関数で市中感染者数を表すことができる。

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。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 週間後の日ごと陽性者数となると仮定する。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れられていないこと、また潜伏期間は人によって異なることを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

新型コロナウイルス感染症の国内発生動向

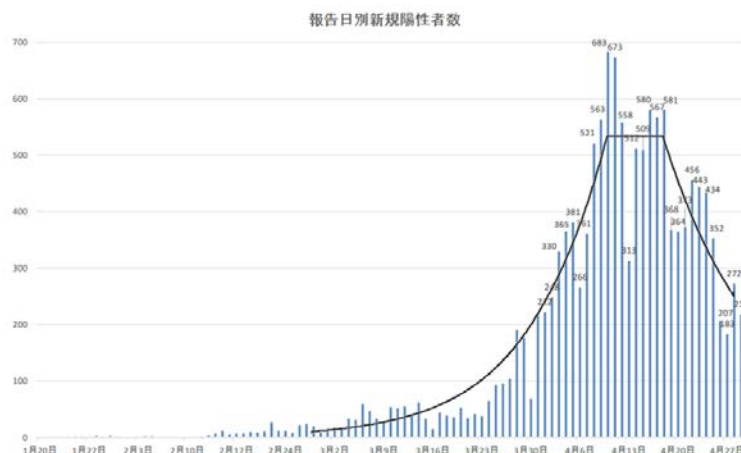


図 2 日本全国の日ごと陽性者数の変化を 4 つの区間毎に指数関数フィットしたもの。データは、厚生労働書発表のもの。

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 、 p 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、治癒までにおよそ 30 日として $\gamma = 0.03$ を仮定する。次に、感染症が現れた初期は、市中感染者で隔離される人は極く少ないと考えられるので、最初の期間では $p = 0$ と仮定する。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。このようにして決めた値を表 1 にまとめる。

表 1 推定されたパラメータの値。 λ はフィットで得た値、() 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
p	(0)	0.06	0.096	<u>0.096</u>
γ	(0.03)	(0.03)	(0.03)	(0.03)

感染症の議論で用いられる基本再生産数は、 $R_0 = \beta N / \gamma$ で定義されており、第 1-3 期では $R_0 = 4.2$ 、第 4 期では $R_0 = 1.7$ となる。SIQR モデルの場合、有効的な基本再生産数は、 $R_0 = \beta N / (p + \gamma)$ で定義すべきであるから、第 4 期の有効基本再生産数は $R_0 = 0.4$ となる。

感染率 βN は、緊急事態宣言後の第 4 期に小さくなっており、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。

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。(8)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、 p と γ を大きくすれば良い。感染率 βN は、感染者と未感染者の接触および感染力にて決まる量であり、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。治癒率 γ は、薬の開発や医療の対応で大きくなるが、市中感染者には効果がない。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 p 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、PCR検査数を増やして隔離率を y 倍増加させる対策を取ったときに、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

$$\lambda(x,y) = |(1-x)\beta N - yp - \gamma| \tag{11}$$

で定義する。上で得た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PCR検査増加倍数に強く依存していることが分かる。

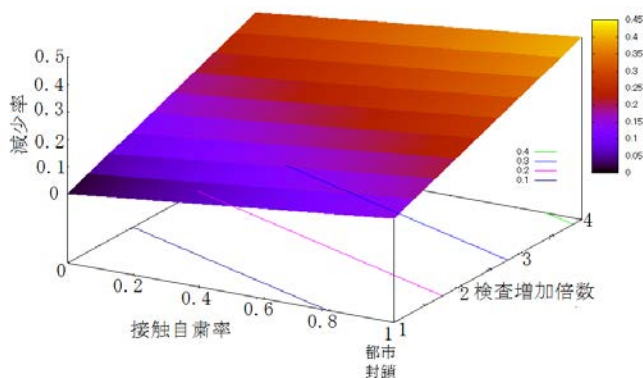


図3 市中感染者の減少率の接触自粛率、隔離率依存性。

表2 いくつかの対策の比較。

対策	x	y	$\lambda(x,y)$	1/10 になるまでの日数
(0) 現状	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) 検査4倍増	0	4	0.288	8
(4) 検査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取られている。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。

明らかに PCR 検査数を増やし、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」という現在の方針を改め、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る。図 4 の曲線 (4) で示したように、検査率（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。

検査数、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、PCR 検査数を増やすべきである。

4 まとめ

まずモデルの妥当性の検証の一つとして、隔離率 p 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 p は、発症率×検査率で与えられる。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 日あたりの検査率は 0.25 程度と考えることができる。前節で得た $p = 0.096$ を用いると、発症率はおよそ 38% となる。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。

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 (7) 式の p を小さくし、 λ が大きくなって、市中の感染者を増加させたことになったと言わざるを得ない。

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

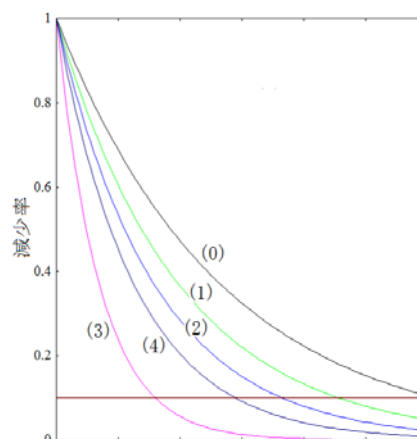


図 4 いくつかの対策による市中感染者数の減少の様子と比較。(0) 現状、(1) 接触 8 割自粛、(2) 都市封鎖、(3) 検査 4 倍増、(4) 検査 2 倍増と接触 5 割自粛。

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、本小論で無視した項から生じる。しかし、この効果が顕著になるのは数ヶ月から1年先のことである。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。著名な学者も「東京の陽性率が高く、大変危険な状態だ。」と述べられていたが、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。

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。

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 90 卷 5 号(岩波書店 2020 年 5 月)掲載予定

https://www.iwanami.co.jp/kagaku/Kagaku_202005_Makino_preprint.pdf