



研究論文

経済と COVID-19 感染症対策を両立させるために —SIR モデルと制御核融合の数式の類似性を用いて—

To Achieve both Economic Activity and Suppression of COVID-19 —Based on the Analogy between the SIR Model and the Controlled Fusion—

御手洗 修^{1,2)}, 柳 長門³⁾

MITARAI Osamu^{1,2)} and YANAGI Nagato³⁾

¹⁾先進核融合・物理教育研究所, ²⁾東海大学, ³⁾核融合科学研究所

(原稿受付: 2021年 5 月 6 日 / 原稿受理: 2021年 7 月 26 日)

感染症学でよく用いられている Susceptible-Infectious-Recovered (SIR) モデルの感染者数の式が D-T 核融合反応の He 灰の式に類似していることに着目して、この感染症を制圧する方法を提案した。即ち、SIR モデルの隔離項の回復時間あるいは感染性時間を隔離に要する時間と解釈して、感染性を有してから保護隔離までの時間を 2~3 日とすれば、外出制限なしで原理的に感染症を制圧できることを示す。これは人の活動を制限することなく経済活動と感染症制圧の両立が理論的には可能であることを意味する。例として東京の第 3 波にここで提案する隔離制御を適用した場合や、初期のワクチン接種中に起きる第 4 波の解析も行い、ワクチン接種効果と隔離制御効果の比較も行う。また、COVID-19 を制圧するのに必要な隔離に要する時間から理論的に検査の頻度を求めることができることも示す。これを実現するためには幅広い検査と検査頻度が重要で、それを実現するためのいろいろな方法の考察も行う。

Keywords:

nuclear fusion, He ash removal, COVID-19, SIR model, isolation time control

1. まえがき

この一年我々の生活は一変した。日々世界中で COVID-19 の感染者数は増え続け、死亡者も増加している。ただの風邪だという人もいるが、回復した後も後遺症があり、単なる風邪ではないことは確かである。明日は我が身という気持ちから、我々一介の核融合研究者ではあるが伝統的に用いられている SIR モデルの感染者数の式が D-T 核融合反応の He 灰の式に類似していることに着目して新たな感染症制圧法を提案した[1, 2]。即ち、伝統的 SIR モデルの感染者数の式の隔離項に時間の制御の考えを新たに導入して SIR モデルの確立を行い、制圧に必要な隔離に要する時間を計算し、その結果から必要とされる検査頻度が得られることを示す。現在、世界中では感染症を制御するために、ワクチンの接種が間に合わない国では外出制限やロックダウンとという国民に犠牲を強いるやり方が主に行われているが、ここではそれ以外の方法が理論的に存在する可能性について議論する。

本論文ではまず SIR モデルの感染者数を表す式と D-T 核融合反応の He 灰の式を対比して基本的な考え方を詳しく説明する。その後、文献[1, 2]で示した計算に用いたパラメータをどのように決定したかを述べる。これらのパラメータを基にして、第 3 波の制御法について SIR モデルを用いて示す。外出制限、隔離時間制御の効果を比較し、感染症制圧にどちらがより有効かを議論する。まず現在の感

染率の場合について、外出制限が緩くなっても新しい生活様式のもとで、3 日に 1 度位の頻度で検査を行い、保護隔離までの時間を短くすれば感染症を抑えることができることを示す。外出制限の緩和が経済活動を意味するので、経済と感染症対策の両立が理論的には可能なことを示す。また今後に起きうる感染率が 1.7 倍高いアルファ株（英国変異株, B.1.1.7）に対する外出制限、ワクチン接種の効果についても調べる。最後にそれらを実現するための対策法や将来のパンデミックに備える方法についても考察を行う。

2. SIR モデルと D-T 核融合の式

感染症の解析で最も良く用いられているのが SIR モデルと呼ばれるモデルであり[3]、日本語の解説も最近では沢山出ている[4-8]。S を非感染者数、I を感染者数、R を回復者数と死亡者数の和、 β を感染係数、 γ を隔離率とすると、その微分方程式は

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -S(t)\beta I(t) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = S(t)\beta I(t) - \gamma I(t) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{dR}{dt} = \gamma I(t) \end{cases} \quad (3)$$

で表すことができる。重要なのは感染者数を表す(2)式

で、これを次のように書き直す。

$$\frac{dI}{dt} = (R_0 - 1)\gamma I(t) \quad (2-1)$$

このとき

$$R_0 = \frac{S(t)\beta}{\gamma}$$

とおいたものを基本再生産数と呼ぶ。この値が1より小さいと感染者数は減少していく。ここで大事な点は(2)式の第2項が次のように時間の割り算で書けることである。

$$\frac{dI}{dt} = \beta S(t)I(t) - \frac{I(t)}{\tau} \quad (2-2)$$

SIRモデルでは τ を回復時間とか感染性時間(感染性期間の平均値)と呼んでいる。これを用いると基本再生産数は $R_0 = S(t)\beta\tau$ と表せる。 τ が短いほど基本再生産数は小さくなる。即ち回復時間が短いほど感染者は減少することになるが、それではこの項の意味がわからない。一方、感染性時間とすれば τ が短いほど人に感染させないので基本再生産数は小さくなり、式の表す意味が理解できる。

この(2)式は核融合研究で使われる次のHe灰の粒子バランス方程式と類似の形をしている[9]。

$$\frac{dn_{\text{He}}}{dt} = \langle \sigma V \rangle_{\text{DT}} n_{\text{D}} n_{\text{T}} - \frac{n_{\text{He}}}{\tau_{\text{He}}} \quad (4)$$

ただし $\langle \sigma V \rangle_{\text{DT}}$ はD-T核融合反応率、 n_{D} は重水素密度、 n_{T} は三重水素密度、 n_{He} はHe灰密度、 τ_{He} はHe灰の粒子閉じ込め時間である。この式はD-T核融合反応



の結果生じた α 粒子(${}^4\text{He}$)が、発生エネルギーをプラズマに与えながら、自らはエネルギーを失い燃えかすとなって平均時間 τ_{He} かけてプラズマから飛び去って真空容器の外に出ていく状態を表したもので、それを図1に示す。 τ_{He} が短いほど燃えかすの ${}^4\text{He}$ は短時間に減少するので、燃料希釈が起きずに核融合反応を持続させることができる。D-Tプラズマの場合、電荷が2の ${}^4\text{He}$ 粒子がいつまでもプラズマ中に存在すると、電荷中性の条件から燃料粒子であるDやTを注入することができなくなる燃料希釈が起こるからである。我々制御核融合研究者はこの ${}^4\text{He}$ の粒子閉じ込め時間を如何にして短くするかという研究に長年取り組んできた。特にD- ${}^3\text{He}$ やD-D核融合のような先進燃料閉じ込め核融合になるほど、その燃えかす粒子の閉じ込め時間が短くなければ核融合反応を維持できないことが明らかになっている[10]。燃えかす粒子の閉じ込め時間を短くする技術は現在研究中で、これは核融合研究における大きな問題のひとつである。

この核融合研究の考え方を感染症のSIRモデルの場合に当てはめると、 ${}^4\text{He}$ 粒子が感染者、重水素と三重水素は必ずしも正確に1対1に対応はしないが感染者と非感染者となる。(2)式の第2項目が重要で、図2に示すように感染

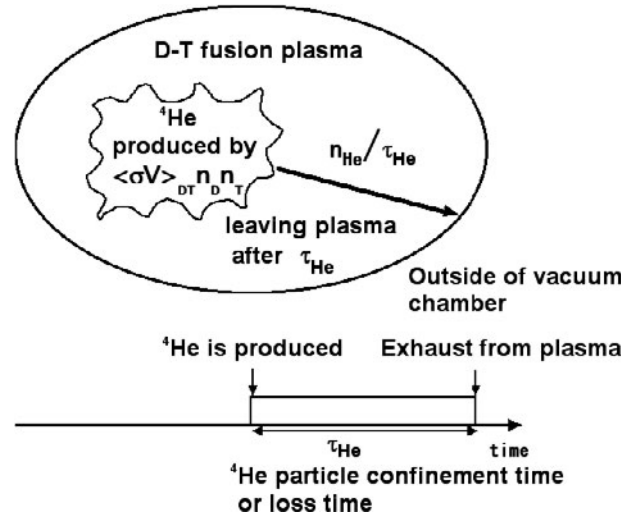


図1 D-T核融合反応プラズマにおけるHe粒子排気概念(参考文献[2]のFig A-1から転載)。

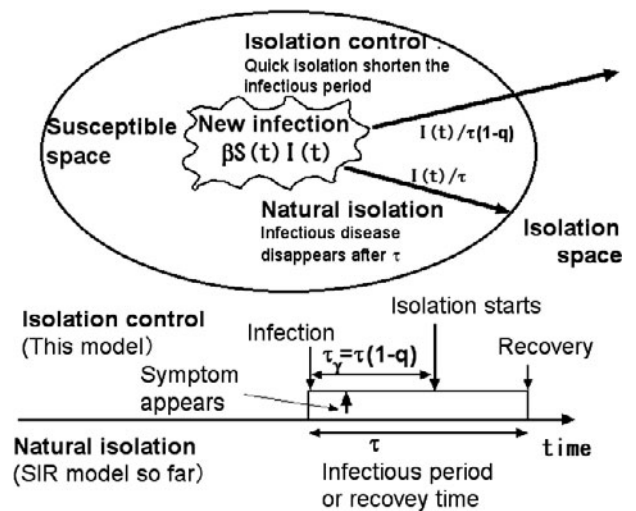


図2 SIRモデルでの自然隔離と本論文での隔離制御の考え方(参考文献[2]のFig. 8から転載)。

者は回復時間や感染性時間である τ 時間経って隔離空間(isolation space)に出ていくと解釈することができる。(注:この場合は回復したので、社会に戻っていくと表現することもできる)。一方、感染性時間とすれば τ あるいは τ_I は隔離にかかった時間と解釈することができる。即ち感染者は隔離されるまでの τ_I 時間だけ社会に留まっているのでその間に感染を広げることになる。つまり、今までのSIRモデル計算では感染者に対して何もしていない状態である。そこでこの時間を人為的に制御して短くすればどのようなかを考察したのが最近の我々の研究である[1, 2]。なお、核融合研究で用いる式の第1項の動きは逆で、 ${}^4\text{He}$ が減少すると燃料が入りやすくなりむしろ核融合反応は増える方向にあるところは異なる。

また、次のように考えることもできる。即ち、感染者を減らすためにはいわゆる隔離率を上げればよい。その効果を調べるには(2)式の第2項で $\gamma \rightarrow \gamma(1+q)$ とにおいて q を外パラメータとしてその依存性を調べれば良い。このとき $q \ll 1$ の場合は線型近似で $\gamma(1+q) \sim \gamma/(1-q) = 1/(\tau(1-q))$ と書

き直すことができる．ここでは q は小さいので，新たに隔離に要する時間 $\tau_y = \tau(1-q)$ を定義し直して， $0 < q < 1$ の範囲で考える．

このようにして，(2)式の第2項に次のように隔離時間制御パラメータ q を導入し，この q によって隔離に要する時間 $\tau_y = \tau(1-q)$ を減少させる（即ち人為的に制御する）とどうなるかを調べることができる．

$$\frac{dI}{dt} = S(t)\beta_o I(t) - \frac{I(t)}{\tau(1-q)} \quad (2-3)$$

要するに，隔離率を上げるということは隔離に要する時間を短くするということと等価である．このようにして隔離率という概念を時間に置き換えることで，我々がめざすべき明確な目標が得られる．

なお，

$$\frac{dI}{dt} = (R_{\text{off}} - 1) \frac{I(t)}{\tau(1-q)} \quad (2-4)$$

とおくと，実効再生産数は

$$R_{\text{off}} = S(t)\beta_o \tau(1-q) = R_o(1-q) \quad (5)$$

となり，隔離に要する時間が短くなるにつれて実効再生産数は小さくなり，感染者は減少する．今までの SIR モデルでは感染者は τ 時間社会に留まっていたのを，本研究では能動的に短時間 τ_y に社会から隔離して感染する時間を減らそうとするものである．(2-3)式において $q \rightarrow 1$ とおくと，損失項である第2項は $-\infty$ となり，たちどころに感染者数 $I(t)$ は減少することになる．その結果，第1項 $S(t)\beta_o I(t)$ も大きく減少し，さらなる感染を防ぐことができる．

この考え方が正しいことは次の Wikipedia の基本再生産数の定義の説明からもわかる．「感染個体が単位時間あたり平均 β の感染を生み出す接触をし，感染性期間が平均 τ であると仮定する．このとき基本再生産数は

$$R_o = \beta\tau$$

で与えられる．この単純な式は R_o を減らし，最終的には感染の伝播を減らすいくつかの方法を示唆する．単位時間あたりの接触を減らす（たとえば，伝播が他者との接触を必要とする場合には，家に留まる），または（防護具などによって）感染を生み出す接触の割合を減らすことで，単位時間あたりの感染を生み出す接触の平均 β を減らすことができる．また感染個体をできるだけ早く発見し，隔離／治療／殺処分（動物の場合によくある）することで，感染性期間の平均 τ を減らすことができる．」[11]

このように家畜の伝染病対策としての殺処分は，隔離に要する時間を短くすることで他の地域の家畜に感染する時間を短くして感染を終わらせる方法である．しかし人間の場合はそうはできない．人間の場合には検査が重要でかつ時間がかかる．今までの感染症では症状が出てから隔離すれば良く，わかりやすかったが，今回の感染症では無症状感染者が存在し，特定するには検査が必要となる．もし無

症状感染者が一人でもいると例えば1ヶ月半後には約200人の感染者が出てくるような状況になる．感染症対策の基本は“検査”と“隔離”であることはだいたい知られている事実である．しかし最も大事なことはこの隔離までの時間である（ここではそれを“隔離時間”と呼ぶ）．ゆっくり隔離を行うとその間に他人を感染させる確率が高くなるのでできるだけ短い方がよい．

感染症の対策として世界中でロックダウンや外出制限が行われているが，その効果を表す式は[1,2]ですすでに述べたように次の(2-5)式で与えることができる． c を外出制限割合とすれば，家にこもる非感染者数は $S(t)c$ で，外を歩く非感染者数は $S(t)(1-c)$ となるので，次のように書くことができる．

$$\frac{dI}{dt} = [S(t)(1-c)]\beta_o I(t) - \frac{I(t)}{\tau(1-q)} \quad (2-5)$$

ただし感染者も出歩くので $I(t)(1-c)$ となり，正確には第1項は $S(t)\beta_o I(t)(1-c)^2$ になる，即ち2体衝突理論の表式になるが，ここでは簡単のために $(1-c)$ とした．これは結果としてより安全側にあるからでもある． $(1-c)^2$ にすると現実の外出制限割合よりも実際には感染者数が少なくなるので，ここではより簡単な $(1-c)$ を用いている．また比較のために自乗の式も使う．詳しくは文献[2]ですすでに議論している．

ワクチンの接種が始まっているが，その効果を表すこともできる． v をワクチン接種割合とすれば，ワクチン接種を受けた非感染者数は $S(t)v$ で，接種を受けていない非感染者数は $S(t)(1-v)$ である．接種を受けずに外出する非感染者数は $S(t)(1-v)(1-c)$ となるので，そのときに感染者 $I(t)$ と接触した場合，感染項は次の第1項のようになる．

$$\frac{dI}{dt} = S(t)(1-c)(1-v)\beta_o I(t) - \frac{I(t)}{\tau(1-q)} \quad (2-6)$$

これを書き直すと

$$\frac{dI}{dt} = (R_{\text{off}} - 1) \frac{I(t)}{\tau(1-q)} \quad (2-7)$$

このとき実効再生産数は

$$R_{\text{off}} = S(t)\beta_o \tau(1-c)(1-v)(1-q) = R_o(1-c)(1-v)(1-q) \quad (6)$$

で表される． c を外出制限割合， v をワクチン接種割合， q は隔離制御パラメータ ($q < 1$) として，いろいろな場合を計算できる．なお，隔離に要する時間を $\tau_y = \tau(1-q)$ としたのは，実効再生産数の表式が他の効果を表す項と同様に簡素に表せるからでもある．これより外出制限 $(1-c)$ と隔離制御 $(1-q)$ は等価であり，外出制限を課さなくても隔離制御を行えば実効再生産数を減らせることがわかる．2週間全員が外出しなければ $c = 1$ なので感染者は発生せず，感染症を制圧できるという考え方は(2-6)式第1項の“ソース項（感染項）”を0にしようとする考え方である．しかしそれでは人間の接触を制限するために経済に大きな

影響が発生する。本論文の考え方は、(2-6)式の第2項の“損失項(隔離項)”を無限大にし、その結果、同時に第1項の“ソース項(感染項)”も0になるという考え方で、大きな違いがある。外出制限やロックダウンでは感染者の特定をする必要はないが、本方法では感染性を有する人の特定が重要でありそこが最も困難なところである。しかし、この考え方では外出制限を厳しくする必要がないので経済に与える影響を減らすことも可能であり、それが実現できればメリットは計り知れない。

(2-6)式の第1項に関する考え方を図に表したのが、次の図3である。図3(a)は何の制限もない場合のSIR曲線であり、図3(b)は外出制限割合を c 、ワクチン接種割合を v としたときのSIR曲線である。各種制限によって感染可能な非感染者数が減少するので、感染者数が減少することが理解できる。

ワクチンに関してはわからないことが多く、例えばワクチンを接種した人が感染しても重症化はしないが、感染性を持っているかどうかはまだ明らかではない。またワクチンの効かない新たな変異種の発生もあり、今後の見極めが必要である。このようにワクチン接種の効果を計算はできるが、現段階ではその効果には不明瞭さがつきまとうことも十分に考慮に入れておかなければいけない。

3. SIRモデルの実際への適用

以上に述べた数式を用いて、初期の東京の感染者数の推移のデータから計算に必要なパラメータを決定した。この

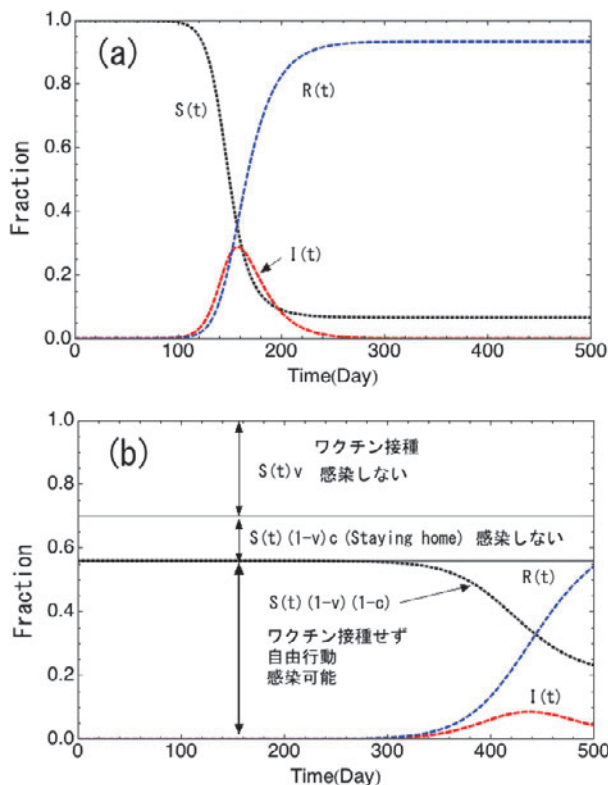


図3 (a)何の制限もないときのSIR曲線。
(b)外出制限割合 $c=0.2$ 、ワクチン接種割合 $v=0.3$ の場合のSIR曲線。

SIRモデルは局地的な封鎖人口における感染症の短期的な流行を記述できると言われているので[3]、人口が最も多く、感染者も多い東京を選んで、さらに人口の増減がないとして解析した。まず、この章の内容は文献[2]ですでに示したものはあるが、第4章以降に必要なので説明する。

3.1 東京第1波

感染率や隔離率の値を求めることは感染初期の段階ではデータが不足しているので意外と難しい。そこでは大胆な推定を行わざるを得ない。ある程度時間が経ってデータが出てくるとやっと計算ができるようになる。ここでは図4(a)に示すように、あとになって発表された感染者数と退院者+死亡者数のデータから回復時間を求め、東京都の3月1日(Day 1)を初期値、その時の感染者数を1人として、4月18日の感染者数にフィッティングするようにしてパラメータを求めた。その結果、50日目までは回復時間 $\tau=17.54$ daysなので隔離率は $\gamma_0=1/\tau=0.057$ 、図4(b)に示すようなフィッティングより感染係数を $\beta_0=0.1653$ とした。したがってこのときの基本再生産数は $R_0=\beta_0/\gamma_0=2.9$ である。中国等の研究[12,13]では $R_0=2.5\sim 3$ が得られているので妥当な値だと考えられる。40日目でフィッティングするとさらに大きな基本再生産数になるので、ここでは50日目の小さくなる値を用いた。本研究では大まかな挙動を解析するのが目的なので、精密なフィッティングはここでは行わない。

3.2 東京第1波の隔離制御

第1波の感染者が200名程度のピーク時に外出制限を

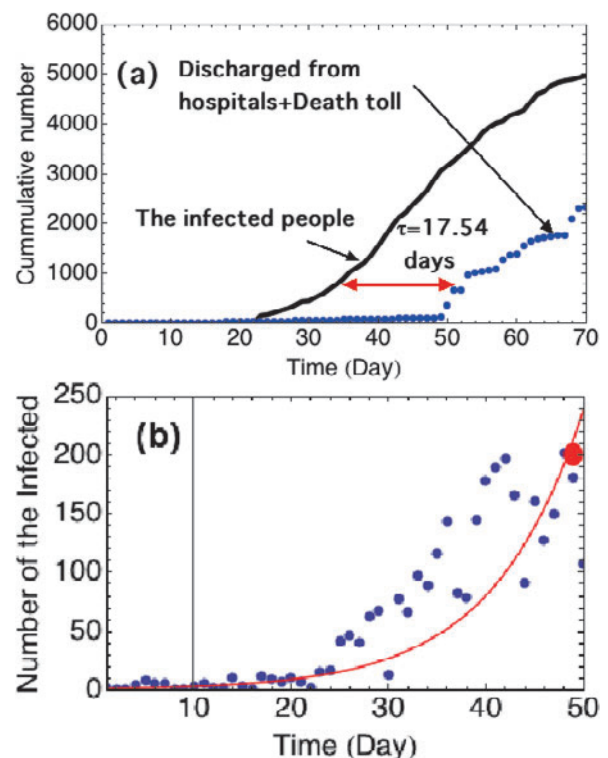


図4 (a)累積感染者数(黒)と退院と死亡者数の和の累積数(青丸)[14]。(b)4月18日の東京の感染者数(青大丸)[15]と何の制御もしない状態のSIRモデルで算出した単純フィッティング曲線(赤実線)。 $\beta_0=0.1653$ 、 $\gamma=0.057$ 、 $R_0=2.9$ が得られる。(参考文献[2]のFig. 2から転載)。

行った場合とそれをせずに隔離制御のみを行った場合の比較を図5に示す。図5(a)は外出制限のみを行った場合であり、図5(b)が隔離制御のみの場合である。図5(a)のように外出制限を $c = 1 - 1/R_0 = 0.6552$ に設定すると感染者数は一定になるが、 $c = 0.8$ に設定すると感染者は減少していく。しかしそれはゆっくりであり大きく減少させるには2-3ヶ月はかかる。一方、図5(b)に示すように外出制限なし($c = 0$)で、隔離に要する時間が $\tau_\gamma = 6$ 日と長い場合は感染者数は一定であるが、隔離に要する時間を3.5日と短くすると急速に感染者が減少することがわかる。5日もかけてゆっくりと隔離するとその間に感染する確率が増えるので、なかなか減少しない。最初の頃には発症してから4日間は自宅にいるようにとのことだったが、これだと発症する前の感染性を有する時間が2日とされているので、隔離までの時間が合計約6日となるので感染者数を減らすことはできない。

この図はまた、感染者が200人程度だと外出制限を課さなくても、大規模検査によって感染性を有した人々全員の保護隔離を3日程度で行えば感染者は1ヶ月程度で0に減少していくことを示している。一旦感染者が0になれば後はよほどのことがない限り感染者は増えない。即ち、外出制限をしないことを経済を回すと定義すれば、経済と感染症対策の両立ができることを理論的に表している。本論文ではさらにいろいろな場合について、この対策が有効であるかどうかを調べる。

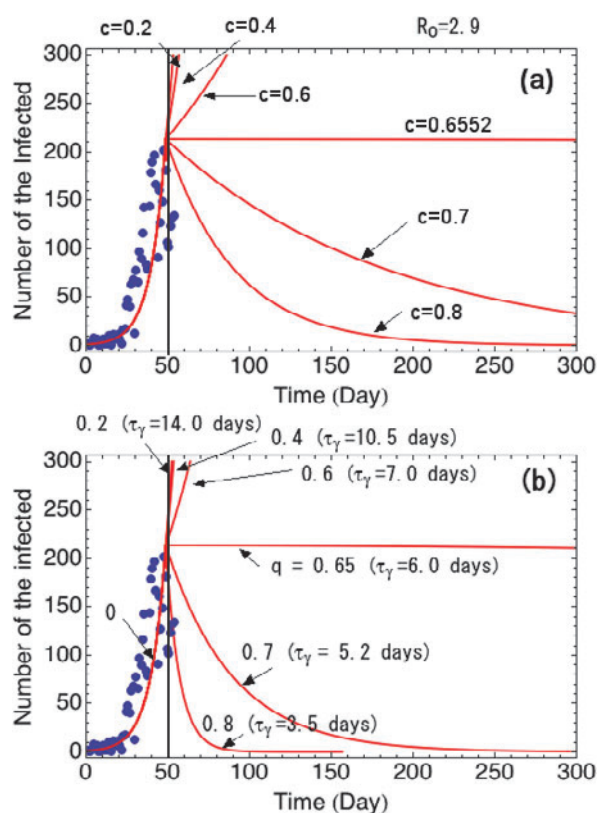


図5 (a)外出制限を行った場合、(b)外出制限を行わず隔離制御のみを行った場合。ここでは全フェーズで $\beta_0 = 0.1653$, $\tau = 17.54$ days, $\gamma = 0.057$, $R_0 = 2.9$ を使用。(a)参考文献[2]Fig. 2-(a)から転載、(b)参考文献[2]Fig. 9から転載[16]。

3.3 東京第1波の減衰後と第2波の増大フェーズ

図6(a)の感染者数のグラフに示すように2020年4月7日に非常事態宣言が出された後、4月18日から感染者数が減少に転じた。詳しい解析は文献[2]で行っている。即ち、医療の学習効果等によるものなのかもしれないが、図6(b)に示すように感染者数と(退院者+死亡者)数のデータから求めた回復時間が、初期の頃より明らかに短く $\tau = 11.1$ days程度なので、隔離率を $\gamma = 1/\tau = 0.09$ と大きくして実際のデータに合うようにした[2]。したがって第1波の立ち上がりフェーズ以後は、隔離率を $\gamma = 1/\tau = 0.09$ に固定した。このとき基本再生産数は $R_0 = 1.83$ に減少する。

非常事態宣言が解除された後、外出制限が緩和され感染者数は徐々に増加していった。この頃にはいわゆる新しい生活様式(マスク、手洗い、社会的距離等)の習慣が根付いてきたと考えられる。それらの効果を外出制限割合で等価的に表すとすれば約 $c = 0.1 \sim 0.3$ 位になるであろうことが推察される。新しい生活様式が叫ばれる前までは $c = 0$ であった。しかし外出制限が解除されると感染者数が徐々に増加するということは、新しい生活様式($c = 0.1 \sim 0.3$)だけでは終息させることができないことを意味している。

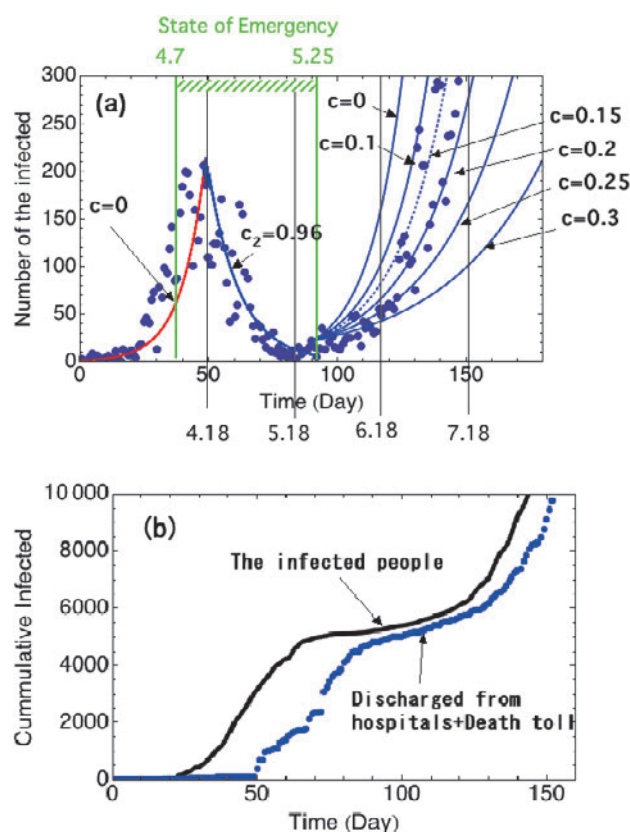


図6 (a)2020年7月11日までの感染者数のデータとフィッティング曲線。赤線は $\gamma = 0.057$, $R_0 = 2.9$, 青線は $\gamma = 0.09$, $R_0 = 1.83$ の場合である。(参考文献[2]のFig. 3-(b)から転載)、(b)累積感染者数(黒)と退院と死亡者数の和の累積数(青小丸)[14]。

4. 東京第3波の解析

4.1 緊急事態宣言（外出制限）の効果

2020年末から東京は第3波に見舞われた。ここでは今までに得たパラメータを用いて今回あらたに2020年10月1日を初期値に取り計算し直す。その結果を図7に示す。2020年10月1日～11月30日は $c = 0.35$ が最も良くフィットする。2020年12月1日以降は $c = 0.35$ ではフィッティングできないので質的に変化したのではないかと考えられる。ここでは $c = 0.2 \sim 0.3$ でフィッティングできたので、これは11月の紅葉シーズンから人出が増えたのが原因ではないかと推定する。2020年12月31日の大晦日の1,330人に焦点を合わせると、外出制限割合 $c = 0.2$, $\beta_o = 0.1653$, $\gamma = 0.09$, $\beta = \beta_o(1-c)$ とおいたときに最も良く合う。なおここでは最小自乗法等は用いていない。

緊急事態宣言（外出制限）が2021年1月8日に発出されたので、その後14日後に減少に転じると考え、そこで8割の外出制限を行うと仮定する。また(2-5)式の第1項は $S(t)\beta_o I(t)(1-c)$ としている。ここでは隔離率を全フェーズで $\gamma = 0.09$ ($R_o = 1.83$)としているので、感染者数が一定になる c の値が図5(a)の $\gamma = 0.057$ ($R_o = 2.9$)のときの0.655から0.455に減少している(図7(a))。外出制限を8割削減すると2020年10月1日のレベルまで減少するのは2ヶ月後の3月10日頃である。

一方、(2-5)式の第1項を2体衝突とし $S(t)\beta_o I(t)(1-c_2)^2$

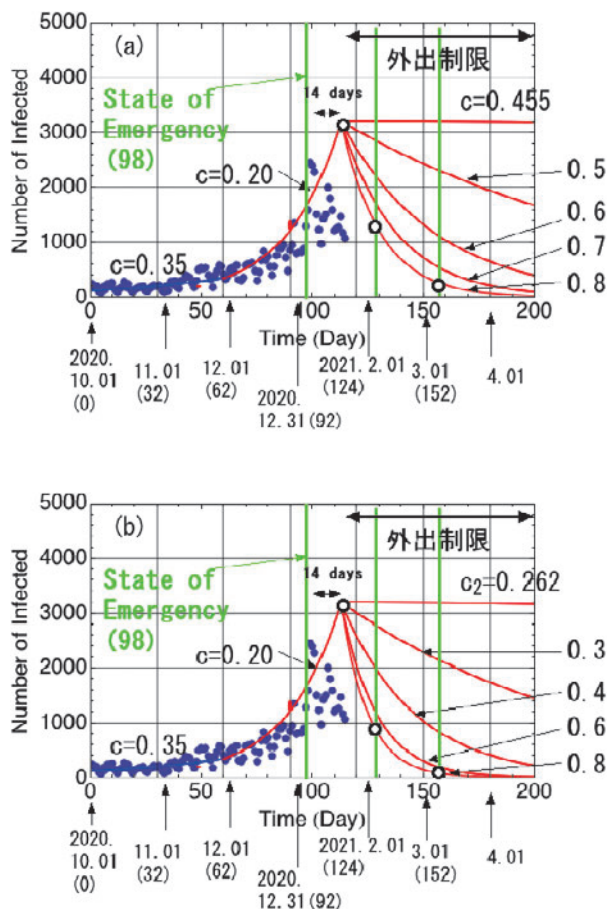


図7 外出制限の式に(a) $(1-c)$ を用いた場合と(b) $(1-c_2)^2$ を用いた場合の感染者の減少の比較(○点で比較)。

にした場合の結果を図7(b)に示す。感染者数が一定になる c_2 の値も0.262と小さくなり、比較してわかるようにその差は意外と大きい。

4.2 緊急事態宣言（外出制限）と隔離制御のシナジー効果

外出制限と隔離制御を同時に行うと終息時期を早めることができる。新しい生活様式だけではこの感染症を終息させることはできないので、外出制限や隔離制御を行う必要がある。

まず外出制限割合を8割に設定して隔離制御を同時に行う場合を図8(a)に示す。隔離を3.3日で行う場合2月7日にはほぼ終息する。隔離までの時間が6.6日と長くなっても3月には終息する。次に外出制限割合を緩めて3割に設定して隔離制御を同時に行う場合を図8(b)に示す。外出制限割合を緩めると隔離までの時間をより短くしなければいけないことがわかる。さらに外出制限割合を撤廃した極端な場合でも、図8(c)に示すように、隔離までの時間として3.3日が達成できれば経済活動しながら2月末には感

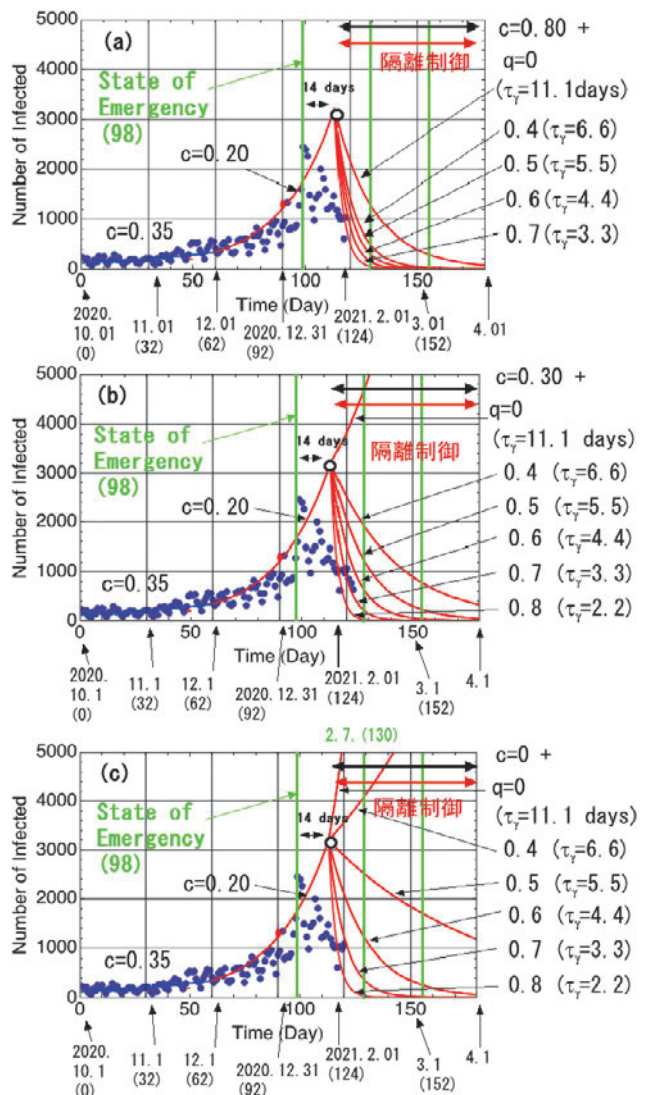


図8 外出制限と隔離制御を同時に行う場合、(a)外出制限が8割の場合($\tau_i = 3.3$ のとき $R_{\text{oeff}} = 0.110$) (b)外出制限が3割の場合($\tau_i = 2.2$ のとき $R_{\text{oeff}} = 0.257$) (c)外出制限がない場合($\tau_i = 2.2$ のとき $R_{\text{oeff}} = 0.367$)。

染者を0にできる。

これらの結果より、手洗い、マスク、社会的距離でいたい $c = 0.2 - 0.3$ が達成されていると仮定した場合、隔離までの時間平均3日程度の達成ができれば経済と感染症対策をほぼ両立させることができることがわかる。そのためにはどの程度の頻度でPCR (polymerase chain reaction) 等の検査を行えば良いかを知ることができる。

また図8に示すように、ここでは緊急事態宣言から2週間の間は単調に増大すると仮定して計算を行ったが、実際のデータでは緊急事態宣言直後に急激に増加し、直ぐに減少に転じている。図8の隔離による減少波形との類似性に注目すると、順調な感染者数の減少の原因は、PCR検査を多くの人が受けて陽性となった人は病院、療養施設あるいは自宅にと結果的に隔離されて起きた“自己隔離現象”ではないかと考えることもできるかもしれない。このことからPCR検査数自体を増加させると自然に自己隔離現象がおき、その結果感染を広げなくなり感染者数が減少するのではないかと推測できる。なお、図8の減衰曲線はフィッティングのためではなく単にその傾向を見るためのものである。

4.3 外出制限、ワクチンと隔離制御のシナジー効果

ワクチン接種が進むと、一般に外出制限も緩和でき隔離に要する時間も長くてすむ。その例を計算してみる(図9)。例えば外出制限が3割の場合でワクチン接種割合が $v = 30\%$ のとき、隔離に要する時間を $\tau_r = 3.3$ days とすると実効再生産数は $R_{\text{eff}} = 0.269$ となる。これは外出制限が3割の場合で隔離に要する時間 $\tau_r = 2.2$ days のときの $R_{\text{eff}} = 0.257$ とほぼ等しい。ちなみに、(5)式からも計算できるように、ワクチンなしでは隔離に要する時間 $\tau_r = 2.2$ days が必要であったものが、ワクチン接種割合を30%にすることによって3.17 days に長くても良いことになる。

$$\tau_r = \tau(1-q) = \frac{R_{\text{eff}}}{\beta_o(1-c)(1-v)} = \frac{0.257133}{0.1653 \cdot 0.7 \cdot 0.7} = 3.17$$

ここで、もし感染力が1.7倍大きいアルファ株が流行したなら、隔離に要する時間を1.86日くらいに短縮しなければいけないことも直ぐに計算できる。

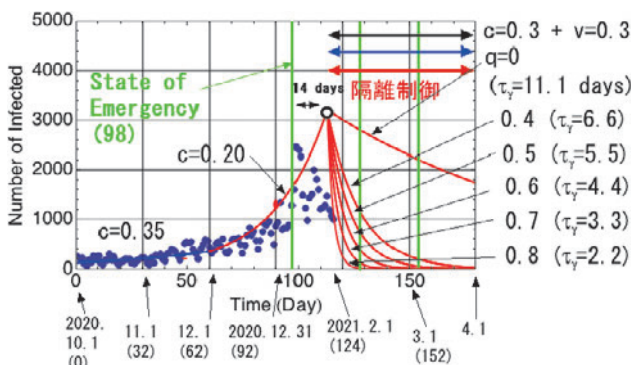


図9 ワクチン接種、外出制限と隔離制御を同時に行う場合、外出制限が3割、ワクチン接種割合が3割の場合 ($\tau_r = 2.2$ のときの $R_{\text{eff}} = 0.2571$ とほぼ等しくなる。)

5. 感染性の検査の頻度

以上述べたように、感染性が出てから3日程度で隔離を行えば、感染症を終息に導けることがわかった。今までの感染症では発症してから感染性を有していたが、それとは異なり COVID-19 は発症する2日前から感染性を有しているとされている[17,18]。したがって3日程度で隔離を行うためには、症状のない無症状感染者の特定が重要ということになる。ここではPCR検査を念頭に置いているが、より速くかつ精度良く検査できる方法が必要である。

また、この隔離に要する時間を目安にするとどの程度の頻度で検査を行えば良いかを知ることができる。その頻度はPCR検査結果がどの程度の時間で得られるかで決まる。図10(a)に示すように、PCR検査結果が1日経って判明する場合と図10(b)に示すよう15分程度で判明する場合で差がある。図10(a)に示すように検査結果が1日経って判明する場合、1日おきに検査しても2日で隔離、3日で隔離と2通りあるので隔離に要する時間は平均2.5日になる。報告が遅れる分だけ隔離に要する時間が長くなる。一方、図10(b)に示すように同日15分程度で判明する場合、2日おきに検査する場合、3日で隔離可能、2日で隔離可能、1日で隔離可能と3通りあるので、平均的には2日で隔離できることになる。このように検査頻度は少ないが、隔離に要する時間は短縮できる。時間が重要なので、短時間に結果がわかる検査方法の開発が重要である。

単純に言えばこのような検査を、都民全員に3日に1度、あるいは2日おきに行い、陽性になったら直ぐに人道的保護隔離を行えば良い。現実には、例えば会社の社員全員をグループに分けてグループ検査を2日おきに実行し

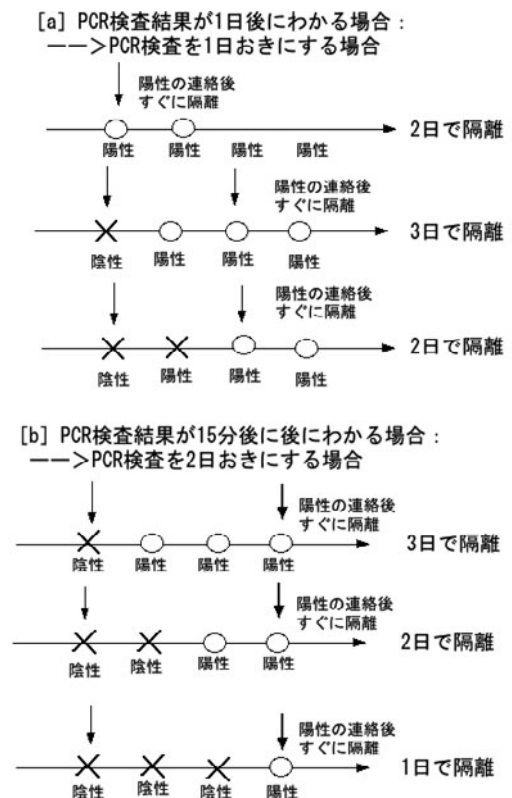


図10 隔離時間から要請されるPCR検査頻度。

て、陽性者が出たら直ぐに隔離を行えるようなシステムを作っておくと素早く対応ができる。いろいろな団体や、病院、介護福祉施設、学校、組合、役所、会社ごとに行えるようにして、また感染者が出そうな場所や、感染したかもしれないと心配している人や、グループに属していない国民がアクセスしやすいような場所に無料検査所を設けて短時間に検査結果を出せるように知恵を絞るとよい。もし感染率が1.7倍高いアルファ株による感染拡大が考えられる場合は、制圧に要求される隔離に要する時間は2日程度と短くなるので、1日おきに直ぐに結果がわかる検査をする必要も生じる。このような検査の頻度に関する結果は、別の角度からも指摘されている[19-22]。

後でも述べるが、地域住民の場合、下水システムを利用して常時モニターしておき、その地域に陽性者がいそうな場合は地域毎にグループ検査を行うことも考えられる。特に感染者が1%程度の場合、グループ検査では感染していない人たちを直ぐに確定できるので便利であり、また感染者を特定するのも数少ない検査ですむ[23]。

6. 第4波とワクチンの効果

現在のような状態を続けていけば、緊急事態宣言で感染者が減少して少なくなっても、感染者が0にならない限り、それを解除すると再び増加するのは自然である。少し妥協して、感染者が何人になったら緊急事態宣言を解除できるかに答えるには、その後の感染の増加がどの程度になるかをあらかじめ知っておかなければいけない。そのためには実際のパラメータを用いていろいろな場合についてあらかじめ計算しておかなければいけない。自分で計算しない限り将来を想像することは意外と難しい。したがって山勘で対策を決定するのを避けるために信頼できる計算結果を提示しておくことが重要である。ここでは今後の参考にしていただくために、今までのパラメータを用いて計算を行った。

外出制限 $c = 0.3$ の場合、図11(a)に感染者の初期値 I_0 が10人から500人の場合のその後の感染の状況を示す。500人の場合1ヶ月後は1,081人、400人の場合865人、300人の場合649人、200人の場合432人、100人の場合216人、10人の場合22人となる。ちなみに1人の場合は2人となり、ほぼ初期値に比例して増大することがわかる。したがって、非常事態宣言は感染者数が最低10人以下になるまで続ける必要がある。

外出制限 $c = 0.3$ のもとで、もしワクチンを1年かけて東京都民全員に接種する場合の結果を図11(b)に示す。ワクチン接種率を直線で仮定している。感染者数は最初に増大するが次第に減少に転じる。感染者数がほぼ最大になる3ヶ月時のワクチンの接種割合は(6)式で $q = 0$,

$$R_{\text{eff}} = R_0(1-c)(1-v) = 1$$

とおいて計算できる。これより

$$v \approx 1 - \frac{1}{R_0(1-c)} = 1 - \frac{1}{1.83 \cdot (1-0.3)} = 0.22$$

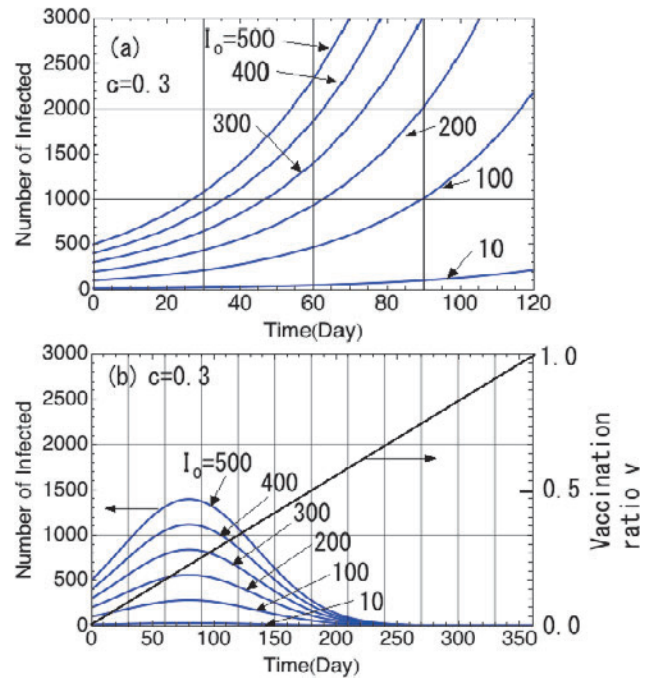


図11 現在流行のウイルス株の場合 ($R_0 = 1.83$)。

(a)外出制限を $c = 0.3$ の場合の感染者数の初期値依存性、
(b)外出制限 $c = 0.3$ 、ワクチン接種割合 v を1年かけて100%にした場合の感染者数の初期値依存性(注: どちらの場合も積極的隔離制御は行っていない $q = 0$ の場合である)。

となるので、ワクチンの効果は22%以上の人が接種して初めて現れることがわかる(図11(b))。また1ヶ月以上経たなければその効果は見えにくく、減少に転じるのは3ヶ月程度かかる。このようにワクチンの効果が現れる接種割合は基本再生産数 R_0 と外出制限割合 c に依存している。

もし感染率が1.7倍高いアルファ株が優勢になる場合は、悲惨な状況になる可能性があるので注意深い対応が必要である。外出制限 $c = 0.3$ の場合以外に何も対策をしない場合、図12(a)に示すように、感染者の初期値 I_0 が500人の場合1ヶ月後は12,255人、400人の場合9,810人、300人の場合7,362人、200人の場合4,912人、100人の場合2,460人、10人の場合249人となる。ちなみに1人の場合は25人となる。即ち感染率が1.7倍大きくなると、感染者数はほぼ10倍以上になることがわかる。これは(2-1)式から得られる感染者数の解の表式 $I(t) = I(0) \text{Exp}[\gamma(R_0(1-c)-1)t]$ から直ぐに計算できる。即ち

$$b = \frac{\text{Exp}[\gamma\{R_0 \cdot 1.7 \cdot (1-c) - 1\}t]}{\text{Exp}[\gamma\{R_0(1-c) - 1\}t]} \\ = \frac{\text{Exp}[0.09\{3.12 \times 0.7 - 1\}30]}{\text{Exp}[0.09\{1.83 \times 0.7 - 1\}30]} = 11.35$$

感染者数の初期値 I_0 が大きいと、その後の感染者数が非常に多くなるので、一定の外出制限をかけて $c = 0.5$ とした状態で、ワクチンを1年間かけて100%まで接種すると仮定した場合の感染者数の変化を図12(b)に示す。感染者数の増加が減少に転じるには4ヶ月ほどかかり、その時の接種率は(6)式より約36%である。外出制限割合を増加させ

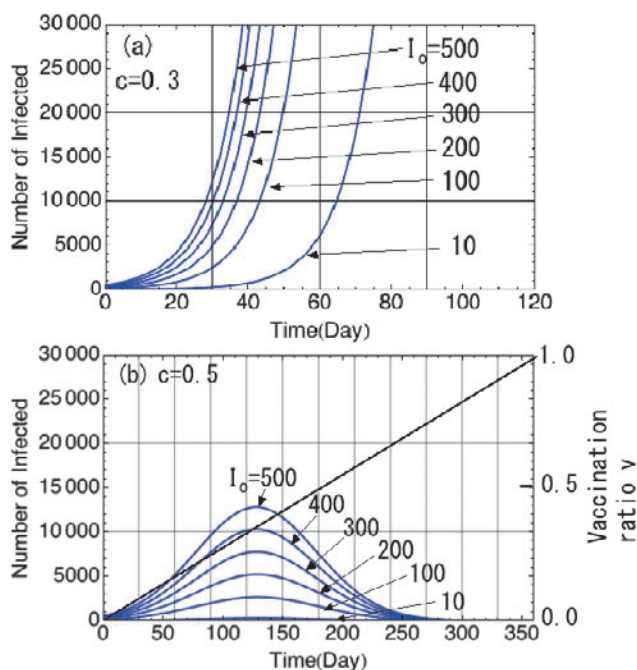


図12 感染率 1.7 倍のアルファ株の場合 ($R_0 = 1.83 \times 1.7 = 3.12$) (a) 外出制限を $c = 0.3$ の場合の感染者数の初期値依存性, (b) 外出制限 $c = 0.5$, ワクチン接種割合 v を 1 年かけて 100% にした場合の感染者数の初期値依存性 (注: どちらの場合も積極的隔離制御は行っていない $q = 0$ の場合である).

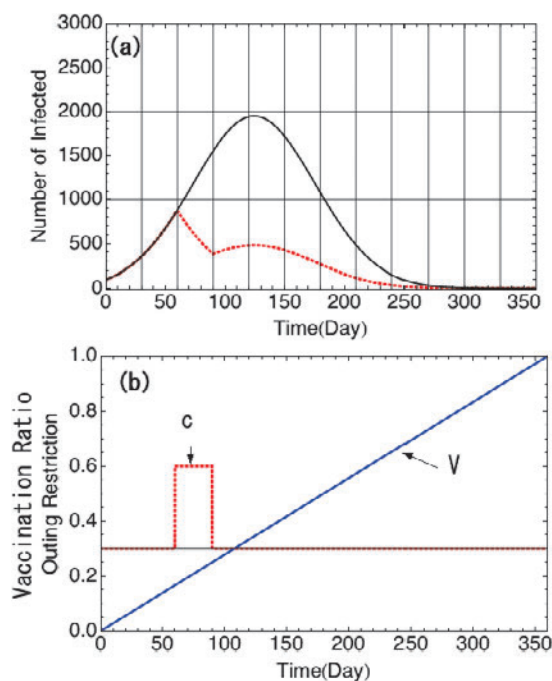


図13 感染率 1.7 倍のアルファ株の場合. (a) 外出制限 $c = 0.3$, ワクチン接種割合 v を 1 年かけて 100% にした場合の感染者数 (黒実線は外出制限一定の場合, 赤点線は外出制限をパルス的に 1 ヶ月かけた場合) (b) 外出制限 $c = 0.3$, ワクチン接種割合 v の時間変化 (隔離制御は行っていない $q = 0$ の場合である).

るともちろん感染者数は減少するが 8 ヶ月ほどの長い時間が必要になる。

感染者の初期値 I_0 が 100 人程度の場合, 図13に示すようにワクチン接種を行いながら, 2 ヶ月後に 6 割の外出制限を 1 ヶ月間行って感染者の急増を減らし, その後解除し, 新しい生活様式で 3 割程度 of 外出制限割合が維持できれば, 感染者数を減少させることができる。もし同時に隔離制御を行えば, 図14に示すように隔離に要する時間が 5.5 日程度と長くても感染者数を急速に減少させることができる。隔離に要する時間が 3.3 日だと 1 ヶ月もかからずに感染者は 0 になる。(注: 感染者数のスケールは図13(a)と図14(a)では 1 桁異なる。) このように積極的に検査による特定と隔離を行うことができればワクチンの接種が遅れても問題がなくなる。

ここではワクチン接種割合を単純な線型モデルで与え, それも 1 回で良いとしたが, それでもワクチンの効果が現れるのには 2 ヶ月以上の時間がかかる。実際には間をおいて 2 回接種することも多く, またウイルスの変異に対する効果も未知数である。したがって現実にはその効果はもっと遅れることが予想される。感染率が大きくなると長い間外出制限をかけることが考えられるが, 感染症制圧の王道である隔離に要する平均時間を短くできれば直ぐに終息に向かう。

7. 議論とまとめ

従来の SIR モデルによれば実効再生産数は

$$R_{\text{eff}} = S(t)\beta_o(1-c)(1-v)/\gamma = R_o(1-c)(1-v)$$

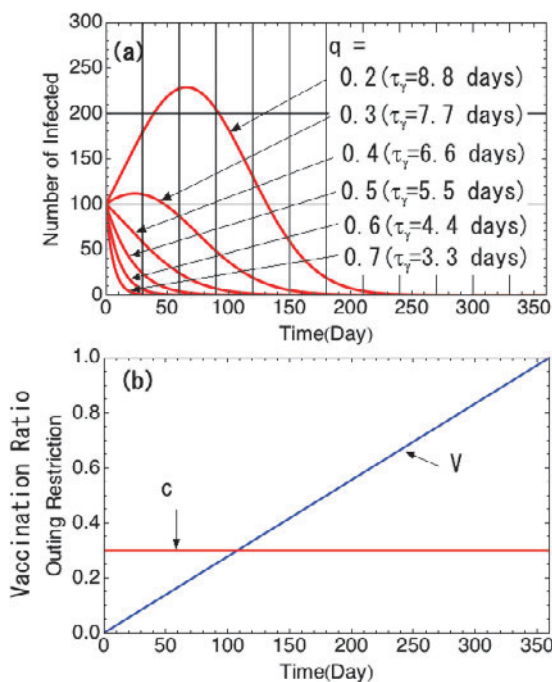


図14 感染率 1.7 倍のアルファ株の場合. (a) 外出制限 $c = 0.3$, ワクチン接種割合 v を 1 年かけて 100% にした場合の感染者数の隔離時間依存性 (b) 外出制限 $c = 0.3$, ワクチン接種割合 v の時間変化。

であり, 確かに外出制限やロックダウン, ワクチン接種によって低減することができる。しかし強制的にロックダウンしたために反発してデモが起きればかえってそれで感染を広げるという矛盾もあり, また, 経済を毀損させるといふ大きな弊害もある[24]。現在多くの国がとっているこ

のような対策は国民に犠牲を強いて、その結果自らの首をも絞めてしまう。しかしながら外出制限を課することなく、またワクチンなしでも感染症を終息させる別の理論的方法が存在しえることが明らかになった。

本論文の内容をまとめると次のようになる。核融合研究のHe灰排気を表す数式とSIRモデルの感染者数を表す第2式の類似性に基づく、隔離項の回復時間あるいは感染性時間を隔離までの時間と考えて感染者数を計算することができる。その結果、感染性が出てから3日程度の（無症状）感染者を特定し保護隔離できれば、COVID-19感染症を終息に導ける。これが実現できれば数値計算で明らかにしたように外出制限やロックダウン、ワクチン接種よりも短期間に感染症を終息できる。それを実現するには大規模検査と短時間の隔離が重要である。これは実効再生産数が

$$R_{\text{eff}} = S(t)\beta_o\tau(1-c)(1-v)(1-q) \\ = R_o(1-c)(1-v)(1-q)$$

と表せることからわかるように、外出制限をなくし $c \rightarrow 0$ として人の活動を活発にする代わりに、 $q \rightarrow 1$ となるように努力して短時間に隔離し、実効再生産数を小さくするという考え方である。経済活動を許容する一方で、国、自治体、国民が一体になり、検査、保護隔離に一生懸命に協力すればCOVID-19を終息させることができることを示している。

感染症のテキストにも本論文で述べたような隔離に要求される時間の考察は見あたらない[25]。早期発見、早期保護隔離すれば感染症を終息させることが可能なことは今までも理解はされていたし、そう主張もされていた。しかしそれを簡単な理論で説明し、数値計算で明確に示すことは今まではなされていなかった。ここで得られた新しい知見に基づき今までの対策の評価を行うことができる。クラスター対策による濃厚接触者の特定は、発症前から感染を抑えるという観点からは優れた方法である。ただ、その時のPCR検査等は1回行うだけでは不十分で、少なくとも3日に1回、2週間程度は行うのがよい。初期段階をすぎても検査数を絞るという考え方も間違いであることがわかる。手当たり次第にPCR検査をしても自己隔離現象が期待できるので、感染者数を減らすことはできると考えられるからである。

感染性を有してから保護隔離を3日以内にすればCOVID-19は制圧できる。そのためには無症状感染者の検査による特定が重要で、発症してからでは遅い。理想的には全都民を対象に2日おきに検査をすれば良い。しかし実際には困難なので、そのような状況にできるだけ近づけていく努力が必要で、そのような仕組みを全力で考え抜く必要がある。実際の検査の具体的な方法については医者である徳田安春氏によっていろいろな案が提案されている[26, 27]。またPCR検査、抗原検査の精度等の問題についてもLarremore氏やShimizu氏の論文において詳しく述べられている[19, 28]。日本ではPCR検査数が少ないことが指摘され、諸外国からも批判されている。一方、非科学的な反論も根強く混在している。このような点についての考

察がなされていて大変興味深い[26, 28]。

実際にこの隔離制御法を採用するにあたっては、まず外出制限を行った状態で、全体的な感染者数を減らしてかつ検査数を大幅に増やして早期隔離できるような準備を行っておくことが重要である。一方、外出制限なしでも新しい生活様式で外出制限2～3割の等価的効果が期待できるので、検査数をさらに積極的に増やして行けば良いと考えられる。その際、徳田安春氏の具体的提案を取り入れるとともに、本論文で述べたように隔離に要する時間から得られるCOVID-19を制圧するための検査の頻度がすでに明らかなのでそれを考慮すればよいと考えられる。

早期隔離によって感染者を0の状態にすることが重要である。感染者が0になってもペットの動物や下水、その他冷凍食品の包装等からの感染、感染者の宿泊していた部屋に残っていたウイルスによる感染があり得るので、それらに注意しつつ、感染者0の状態を何ヶ月も続けられるようにすることが重要である。「ウィズコロナ」を目標にするよりも「0コロナ」を目標にして努力する方が良い。

また、最近になって感染力の強いアルファ株、ベータ株（南アメリカ変異株, B.1.351）、デルタ株（インド変異株, B.1.617.2）が見出され、これらの変異株には現在開発されているワクチンも効果が下がるという説も出ている。完璧なワクチンができることは望ましいことで、それで感染症をかなり押さえ込むことはできるが、本論文で明らかにしたのは、ワクチンなしでも感染症を制圧できるということである。感染者数が増加すると変異株も増え、ワクチンの有効性も低下する等いろいろな問題が起きるので[29]、同時にこの隔離制御を進めるのがよいと思われる。

8. 考えられうる対策

ここで提案した感染症対策を実現するためには以下のようなことが考えられる。

- (1) 早期発見、早期保護隔離が重要であることが明らかになったので、医療崩壊を防ぐためにも感染症対策の行いやすい十分な人数を収容できる保護隔離療養施設を作る。それによって入院待ちや調整待ちといった状態で生じる感染可能時間を減らすことが可能となる。保護隔離された人々は感染症制圧の功労者であるから感染症制圧協力報奨金のようなものを出すことも考えられる。特に感染率1.7倍のアルファ株が主流になった場合、従来の約10倍の感染者が出る恐れがあるので保護隔離療養施設の増設を考慮する必要がある。
- (2) 大勢の人が集まる劇場や、競技場などのイベント会場や、あるいは空港などでは最近外国で行われているコロナ検査犬を導入し、陽性者を見つけだすような努力をする必要がある。フィンランドの空港での実験ではほぼ100%に近い確率で陽性者を特定できるということである[30, 31]。できるだけ沢山の人々を検査して、感染性を有する人を特定するためにもこのような機会を活用するのが良いと考えられる。
- (3) デジタル技術を用いた接触アプリによって感染を若干食い止めることができたという報告が最近なされてい

る[32, 33]. 人手を用いた濃厚接触者の確認よりも1日程度早く洗い出すことができるという暫定的な結果である。1日でも早く保護隔離ができれば感染を減らすことができるのでそれは貴重である。この感染症は時間が重要なので、このような技術を一刻も早く確立して、役立てるように努力することが必要であろう。もちろん現在の保健所の方々の濃厚接触者対策は全く正しいものであることは言うまでもない。

- (4) 特に全体的に感染者数が減少してきた場合、いわゆる下げ止まりになってきた場合、下水システムを利用して陽性者を特定する方法を導入する必要がある[34-38]。陽性感染者の多い場所を特定して、その住民に協力を求めて検査すれば少ないPCR検査ですむ。これはポリオウイルスの撲滅の際に活用された方法でもある。その際には、外国では一般的なグループ検査を取り入れなければいけない。今後発生すると予想されるあらゆるパンデミックに有効な方法なので、下水システムを用いたPCR検査方法をこの機会に確立するといふ。

ここで述べた無症状感染者の早期発見と早期隔離する方法は、幅広く、迅速なより正確な検査法と国民の協力によってのみ実現できるワクチンがなくても感染症を制圧できる唯一の方法である。今まで一人一人の健康管理が国全体の状況を左右するようなことはなかったが、今やすべての人が平等に健康管理できるような社会が必要とされている。

参考文献

- [1] 御手洗 修:「SIRモデルに基づく隔離制御によるCOVID-19感染症の制圧」5月(2020).
<http://www.qpn.kyushu-u.ac.jp/lab7/COVID-19-Mitarai-2020-0519.pdf>.
- [2] O. Mitarai and N. Yanagi, "Suppression of COVID-19 infection by isolation time control based on the SIR model and an analogy from nuclear fusion research", medRxiv preprint doi: <https://doi.org/10.1101/2020.09.18.20197723>, this version posted September 20, 2020.
or O. Mitarai and N. Yanagi, "Suppression method of COVID-19 infection by isolation time control based on the SIR model and the analogy of nuclear fusion research" NIFS report: NIFS-1128 (2020) <https://www.nifs.ac.jp/report/NIFS-1128.pdf>.
- [3] W.O.Kermack and A.G.McKendrick, "Contributions to the mathematical theory of epidemics-I", Proc. Royal Society Series A **115**, 700 (1927).
- [4] 西浦 博, 稲葉 寿:「感染症流行の予測: 感染症数理モデルにおける定量的課題」, 統計数理 **54**, 461 (2006).
- [5] 稲葉 寿:「微分方程式と感染症数理疫学」数理科学 **46**, 19 (2008).
- [6] 門 信一郎:「この感染は拡大か収束か: 再生産数 R の物理的意味と決定—単純なモデル方程式に基づく行動変容の判断のために—」2020.03.27公開, Reprint from: RAD-IT21 WEB マガジン.
- [7] 小田垣 孝:「新型コロナウイルスの蔓延に関する一考察」, 物性研究・電子版 **8**, 082101 (2020).
- [8] 牧野淳一郎: 科学 **90**, 428 (2020).
- [9] O. Mitarai and K. Muraoka, Nucl. Fusion **37**, 1523 (1997).
- [10] O. Mitarai *et al.*, Fusion Eng. Des. **136**, 82 (2018).
- [11] 「基本再生産数」ウキペディア, <https://ja.wikipedia.org/wiki/>
- [12] Y. Liu *et al.*, J. Travel Medicine, **1-4** (2020). doi:10.1093/jtm/taaa021.
- [13] T. Liu *et al.*, "Transmission dynamics of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV)", bioRxiv (2020). doi:<https://doi.org/10.1101/2020.01.25.919787>
- [14] Toyokeizai online, Coronavirus Disease (COVID-19) Situation Report in Japan, (2020), <https://toyokeizai.net/sp/visual/tko/covid19/>
- [15] H. Okumura, COVID-19, CSV data, (2020) <https://oku.edu.mie-u.ac.jp/okumura/python/COVID-19.html>
- [16] 文献[2]のFig.4-(d)とFig.9のグラフ(本論文のFig.5-(b))を計算したMathematicaプログラムはWolfram Researchの要請によりnotebookarchiveにアップロードされている. <https://www.notebookarchive.org/collection-pod?collection=mitarai-suppression-covid-19-sir-model-nuclear-fusion>
<https://www.notebookarchive.org/2021-01-39o3bbs/>
<https://www.notebookarchive.org/2021-01-39nzsnp/>
<https://notebookarchive.org/search?category=Academic%20Articles%20And%20Supplements>
- [17] B.L. Dickens *et al.*, www.thelenset.com, **395**, 1541 (2020). [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31016-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31016-3)
- [18] Q-X Long *et al.*, Nat. Med. **26**, 1200 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0965-6>
- [19] M.J. Mina *et al.*, N. Eng. J. Med. **383**, e120 (2020). DOI:10.1056/NEJMp2025631
- [20] B. Daniel *et al.*, Sci. Adv. 2021; **7**: eabd5393, 1 (2021). doi:<http://advances.sciencemag.org/content/7/1/eabd5393>
- [21] Xi He *et al.*, Nat. Med. **26**, 672 (2020), doi: <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0869-5>
- [22] T.C. Elizabeth *et al.*, "Frequency of routine testing for COVID-19 in high-risk environments to reduce workplace outbreaks", medRxiv preprint doi:<https://doi.org/10.1101/2020.04.30.20087015>
- [23] L. Mutesa *et al.*, Nature **586**, 276 (2021). doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2885-5>
- [24] M. Bognanni *et al.*, "Economics and Epidemics: Evidence from an Estimated Spatial Econ-SIR Model", IZA Discussion Papers, No.13797, Institute of Labor Economics (IZA), Bonn (2020). <http://perseus.iies.su.se/kmitm/covid.pdf>
- [25] E. Vynnycky and R. White, *An Introduction to Infectious Disease Modeling* (Oxford University Press, 2010).
- [26] 徳田安春:「ゼロコロナを目指すための検査戦略」科学 **91** (2021).
- [27] Y. Tokuda *et al.*, J. Gen. Family Med. **22**, 1 (2021), DOI: 10.1002/jgf2.409.
- [28] K. Shimizu *et al.*, J. Gen. Family Med. **22**, 67 (2021), DOI: 10.1002/jgf2.420
- [29] C. Aschwanden, Nature **591**, 25 (2021).
- [30] P. Jendrny *et al.*, BMC Infectious Diseases **20**:536 (2020).

- <https://doi.org/10.1186/s12879-020-05281-3>
- [31] D. Grandjeana *et al.*, "Detection dogs as a help in the detection of COVID-19 Can the dog alert on COVID-19 positive persons by sniffing auxiliary sweat samples ? Proof-of-concept study", bioRxiv preprint(2020). doi:<https://doi.org/10.1101/2020.06.03.132134>.
 - [32] D. Lewis, Nature **591**, 19 (2021).
 - [33] T. Ballouz *et al.*, "Digital proximity tracing app notifications lead to faster quarantine in non-household contacts: results from the Zurich SARS-CoV-2 Cohort Study", Preprint at medRxiv (2020). <https://doi.org/10.1101/2020.12.21.20248619>
 - [34] T. Poyry *et al.*, Appl. Environ. Microbiol. **54**, 371 (1988).
 - [35] G. Medema, Environ. Sci. Technol. Lett. **7**, 511 (2020).
 - [36] G. Chavarria-Miró *et al.*, "Sentinel surveillance of SARS-CoV-2 in wastewater anticipates the occurrence of COVID-19 cases", medRxiv preprint (2020). doi:<https://doi.org/10.1101/2020.06.13.20129627>.
 - [37] E. Haramoto *et al.*, "First environmental surveillance for the presence of SARS-CoV-2 RNA in wastewater and river water in Japan", medRxiv preprint (2020). doi:<https://doi.org/10.1101/2020.06.04.20122747>.
 - [38] J. Peccia *et al.*, Nat. Biotechnol. **38**, 1164 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0684-z>