

# NATIONAL INSTITUTE FOR FUSION SCIENCE

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, 柳 長門  
先進核融合・物理教育研究所, 東海大学, 核融合科学研究所  
MITARAI Osamu and YANAGI Nagato

( Received - April 29, 2021 )

NIFS-1129

May 23, 2021

This report was prepared as a preprint of work performed as a collaboration research of the National Institute for Fusion Science (NIFS) of Japan. The views presented here are solely those of the authors. This document is intended for information only and may be published in a journal after some rearrangement of its contents in the future.

Inquiries about copyright should be addressed to the NIFS Library, National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu-ken 509-5292 JAPAN.

E-mail: tosho@nifs.ac.jp

**<Notice about copyright>**

NIFS authorized Japan Academic Association For Copyright Clearance (JAC) to license our reproduction rights and reuse rights of copyrighted works. If you wish to obtain permissions of these rights, please refer to the homepage of JAC (<http://jaacc.org/eng/>) and confirm appropriate organizations to request permission.

# 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, 柳 長門<sup>1</sup>

MITARAI Osamu and YANAGI Nagato

先進核融合・物理教育研究所, 東海大学, <sup>(1)</sup>核融合科学研究所

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[1][2]. 即ち, SIR モデルの隔離項の回復時間を隔離時間と解釈して, 感染性を有してから隔離までの時間を 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 波に隔離制御を適用した場合や, 次の第 4 波の解析も行いワクチン接種との比較検討も行う. 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.

Key words: 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.

本論文ではまずここで提案している隔離制御の基本的な考え方について思考実験を行い, 誰にでも理解できるようにわかりやすい直感的な説明を行う. その後, 文献[1][2]で示した結果の要点を述べ, 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, 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 倍高い英国株に対する外出制限, 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. 隔離制御の思考実験

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. この隔離制御の基本的な考え方はすでに人類はよく知っている. すべての人に瞬時にご理解いただくためにそれをあえて述べる. その例が鳥インフルエンザ等の家畜の伝染病対策である. 例えば鳥インフルエンザウイルスが検出されると, 我々人間はたちどころにそれ以上の感染を防ぐために殺処分を行う. 数万羽を地下に埋葬する. 他の地域の鳥に感染する時間を短くし 0 にすることで感染を終わらせることができる.

しかし人間の場合にはそうはできない. 図 1 に示すように, 感染してから感染性を有するようになるといわれている平均時間を 14 日とすると, 14 日前に感染していた人が, 今日大量の検査によって感染性を有することがわかると全員直ぐに隔離するようにする. その結果, 今日感染させることはなくなる. 感染させる時間をできるだけ短くし, 0 になるように真似るのである. 明日になると, 13 日前に感染していた人が翌日

の検査によって感染性を有することがわかると全員直ぐに同様に隔離される。その結果、13 日前に感染していた人は社会空間には一人もいなくなる。このようにして 14 日間経つと、検査が完全に行われて全員が隔離されれば感染者はこの経済社会空間には一人もいなくなる。

このように、感染したかどうかがわかる 14 日間程度の感染待ち時間が経って初めてこの感染症を制圧することができる。このように人間の場合には検査が重要でかつ時間がかかるのであり、そこが家畜の感染対策との大きな違いである。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重要である。もし無症状感染者が一人でもいると 1 ヶ月半後には約 200 人の感染者が出てくる (図 5-(b)参照)。

2 週間全員が外出しなければ感染症を制圧できるという考え方は §3 の (2-6) 式の 第 1 項: "ソース項(感染項)" を 0 にしようとする考え方である。しかしこれ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: "損失項(隔離項)" を無限大にし、その結果、同時に第 1 項: "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やる必要はないが、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もある。しかし、この考え方では外出制限がないので経済に与える影響をなくすることも原理的には可能であり、それが実現できればメリットは計り知れない。

このように、現在行っているような外出制限よりも社会にダメージを与えない方法が、この感染性を有する人の特定と隔離までの時間の短縮化である。SIR モデルを用いた数値計算の結果、外出制限を緩めてもあるいはなくしてもこの隔離に要する時間を短縮化できれば感染症を終息させることができる。政府、自治体、国民が一体となり広範かつ頻繁な検査と隔離に要する時間を短縮化する努力をすれば、原理的には経済と感染症対策の両立を可能にすることができる。

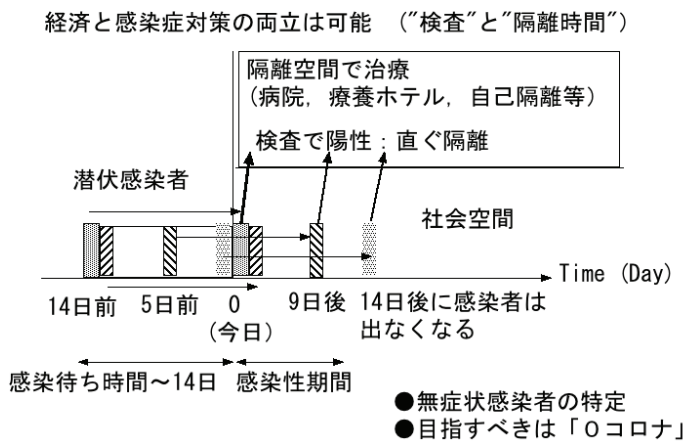


図 1 経済と感染症対策の両立を可能とする隔離時間制御法

### § 3. SIR モデルとパラメータ

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,  $\beta$  を感染係数,  $\gamma$  を隔離率とすると, その微分方程式は

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

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

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

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 より小さいと感染は減少していく。ここで大事な点は(2)式が次の様に時間の割り算で書けることである。

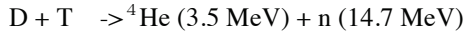
$$\frac{dI}{dt} = \beta S(t) I(t) - \frac{I(t)}{\tau} \quad (2-2)$$

SIR モデルでは  $\tau$  を回復時間と呼んでいる．これを用いると基本再生産数は  $R_0 = S(t)\beta\tau$  と表せる． $\tau$  が短いほど基本再生産数は小さくなり，即ち回復時間が短いほど感染させないので，感染者が減少することがわかる．

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]．

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

ただし  $\langle \sigma V \rangle_{DT}$  は DT 核融合反応率， $n_D$  は重水素密度， $n_T$  は三重水素密度， $\tau_{He}$  は He 灰の粒子閉じ込め時間である，この式は DT 核融合反応



の結果生じた  $\alpha$  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  $\tau$  時間かけてプラズマから飛び去って行く様子を表したものである．発生した燃えかすの  ${}^4\text{He}$  の密度の時間変化を表す． $\tau$  が短いほど燃えかすの  ${}^4\text{He}$  は短時間に減少するので核融合反応を持続させることができる．その様子を表したのが 図 2 である．燃えかすである  ${}^4\text{He}$  は平均的な  $\tau_{He}$  時間経ってプラズマから真空容器の外に出て行く．D-T プラズマの場合，電荷が 2 の 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．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でき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まだ未完成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．

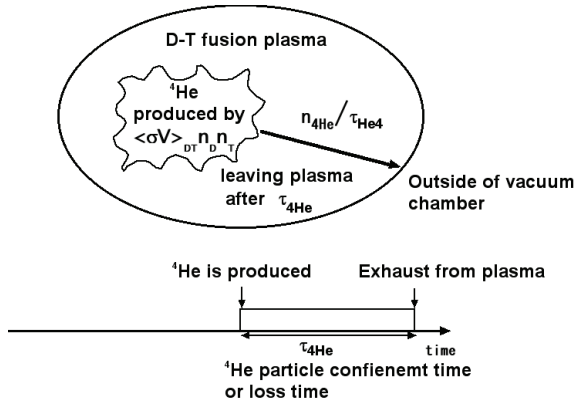


図 2 D-T 核融合反応プラズマにおける He 粒子排気概念 (参考文献 [2] の Fig A-1 から転載)

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 3 に示すように感染者は回復時間である  $\tau$  時間経って隔離空間 (isolation space) に出て行くという解釈をすることができる．(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)． $\tau$  は隔離にかかった時間でもある．感染者は  $\tau$  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，数式上では感染者のなすがままであり，制御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たとすればどのようなようになるかを考察したのが今までの我々の研究である [1][2]．

隔離に要する時間を人為的に制御するために，(2)式を次の様子的に書き直して 隔離時間制御パラメータを  $q$  として導入する． $q$  によって隔離に要する時間  $\tau_f = \tau(1-q)$  を変化させる (即ち制御する) とどうなるかを考えることができる．

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

なお，

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

とおくと，実効再生産数は

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

となり，隔離に要する時間が短くなるにつれて小さくなり，感染者が減少することがわかる．これらの様子

を図3に示す. 今までの SIR モデルでは感染者は  $\tau$  時間社会に留まっていたのを, 能動的に社会から隔離して感染する時間を減らそうという努力を表わしている. §2 で述べた隔離制御の思考実験は(2-3)式において  $q=1$  に対応する. そのとき第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  $S(t)\beta_0 I(t)$  も0となり, 誰かをさらに感染させることもなくなる. 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.

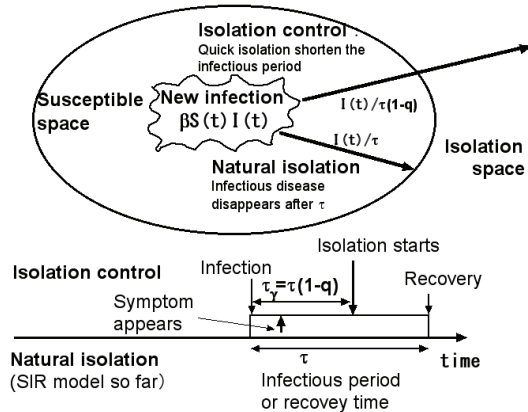


図.3 SIRモデルでの自然隔離と本論文での隔離制御の考え方  
(参考文献 [2]の Fig. 8 から転載)

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, 外を出歩く非感染者数は  $S(t)(1-c)$  となるので, 次の様を書くことができる.

$$\frac{dI}{dt} = [S(t)(1-c)]\beta_0 I(t) - \frac{I(t)}{\tau(1-q)} \quad (2-5)$$

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  $S(t)\beta_0 I(t)(1-c)^2$  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. 接種も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  $I$  と接触した場合, 感染項は次の第1項になる.

$$\frac{dI}{dt} = S(t)(1-c)(1-v)\beta_0 I(t) - \frac{I(t)}{\tau(1-q)} \quad (2-6)$$

これを書き直すと

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

このとき実効再生産数は

$$R_{\text{eff}} = S(t)\beta_0\tau(1-c)(1-v)(1-q) = R_0(1-c)(1-v)(1-q) \quad (6)$$

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. 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.

第1項に関する考え方を図に表したのが, 次の図である. 図4-(a)は何の制限もない場合の SIR 曲線であり, 図4-(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ことが理解できる.

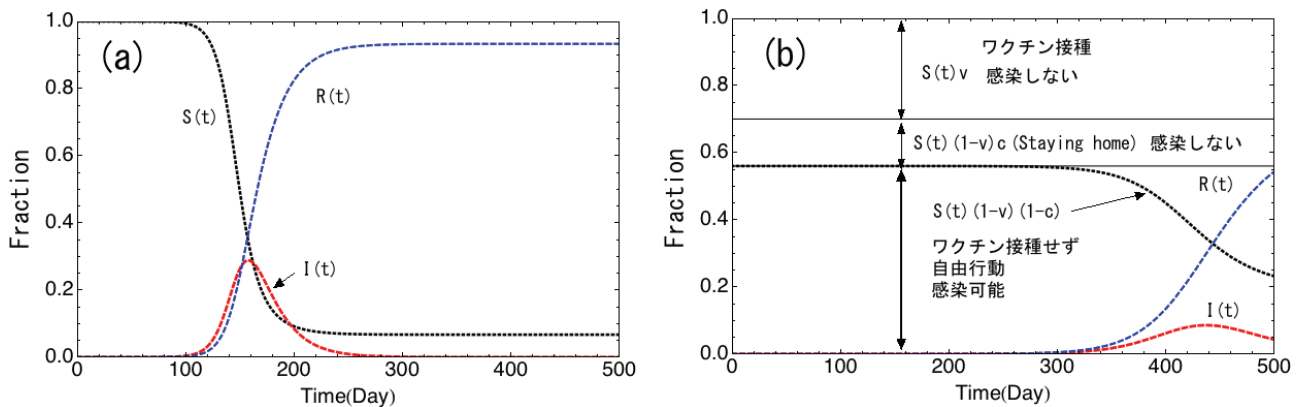


図4 (a) 何の制限もないときの SIR 曲線  
 (b) 外出制限割合  $c=0.2$ , ワクチン接種割合  $v=0.3$  の場合の SIR 曲線

しかしながら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。

### § 3.1. 東京第 1 波

以上の数式を用いて文献[2] で得られたグラフについての説明を行う。それは §3 で論じる第 3 波の解析に第 2 波までのデータを用いるからである。

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が意外と難しい。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 5-(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 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  $\gamma=1/\tau=0.057$ 、図 5-(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。従ってこのときの基本再生産数は  $R_0=\beta_0/\gamma=2.9$  である。中国等の研究 [11][12]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。

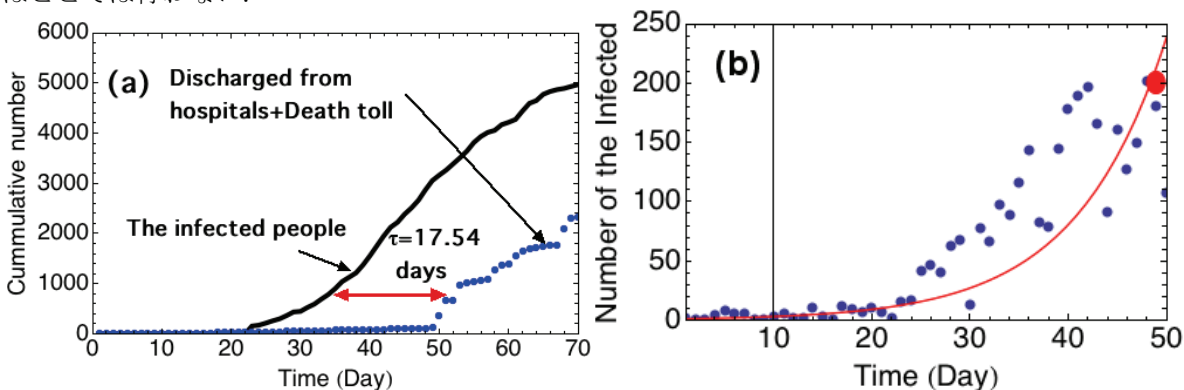


図 5 (a) 累積感染者数(黒)と退院と死亡者数の和の累積数(青) [13]. (b) その日の東京の感染者数(青点)[14]と何の制御もしない状態の SIR モデルで算出した単純フィッティング曲線(赤).  $\beta=0.1653, \gamma=0.057, R_0=2.9$  が得られる. (参考文献 [2]の Fig.2 から転載)

### § 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 6 に示す。図 6-(a)は外出制限を行った場合であり、図 6-(b)が隔離制御のみの場合である。外出制限を  $c=1-\gamma/\beta_0=0.6552$  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が、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、隔離までの時間が  $\tau_f=1/\beta_0\sim 6$  日と長い場合は感染者数は一定であるが、隔離までの時間を 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日と言われているので、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。

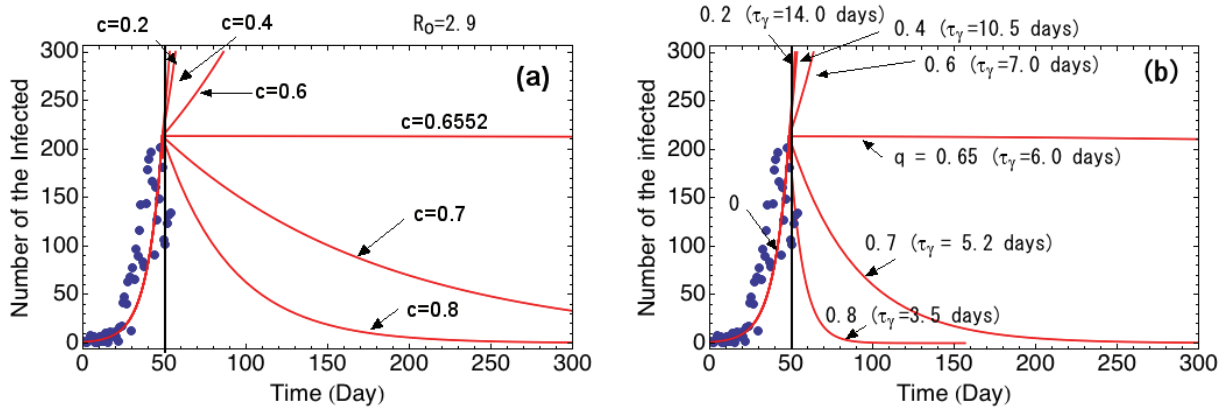


図6 (a) 外出制限を行った場合, (b) 外出制限を行わず隔離制御のみを行った場合  
 ここでは全フェーズで $\beta_0 = 0.1653$ ,  $\tau = 17.54$  days,  $\gamma = 0.057$ ,  $R_0 = 2.9$  を使用. ((a) 参考文献[2] Fig. 2-(a) から転載, (b) 参考文献[2] Fig. 9 から転載) [15]

### § 3.3. 東京第1波の減衰後と第2波の増大フェーズ

図7-(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7-(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良く合うようにした[2]。従って第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。その時、基本再生産数は $R_0 = 1.83$ と減少する。

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事は、新しい生活様式だけでは終息させることはできないことを意味していると考えられる。

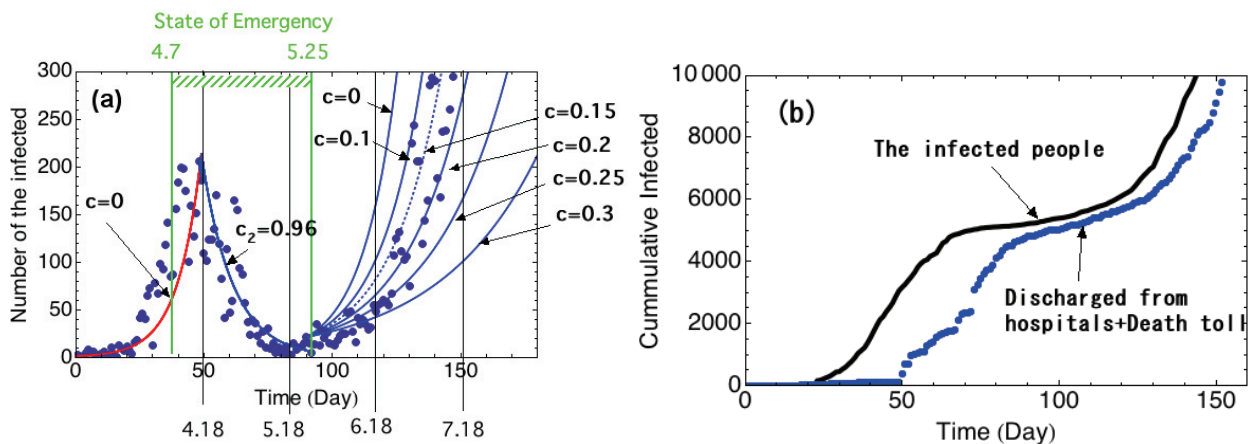


図7 (a) 2020年7月11日までの感染者数のデータとフィッティング曲線。赤線は $\gamma = 0.057, R_0 = 2.9$ , 青線は $\gamma = 0.09, R_0 = 1.83$ の場合である。(参考文献[2]の Fig. 3-(b) から転載), (b) 累積感染者数(黒)と退院と死亡者数の和の累積数(青) [13].

## § 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 8 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．これは 11 月の紅葉シーズンから入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  $c=0.2$ ， $\beta_0=0.1653$ ， $\gamma=0.09$ ， $\beta=\beta_0(1-c)$  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，14 日後に減少に転じると仮定し，そこで外出制限をかけ 2020 年 5 月に行った 8 割の外出削減まで行うと仮定する．また(2-5)式の第 1 項は  $S(t)\beta_0 I(t)(1-c)$  としている．ここでは隔離率を全フェーズで  $\gamma=0.09$  ( $R_0=1.83$ ) としているので，感染者数が一定になる  $c$  の値が図 8-(a)の  $\gamma=0.057$  ( $R_0=2.9$ )のときの 0.655 から 0.455 に減少している．外出制限を 8 割削減とすると，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  $S(t)\beta_0 I(t)(1-c_2)^2$  にした場合の結果を図 8-(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，比較してわかる様にその差は意外と大きい．ここでは適宜両方の場合について考える．

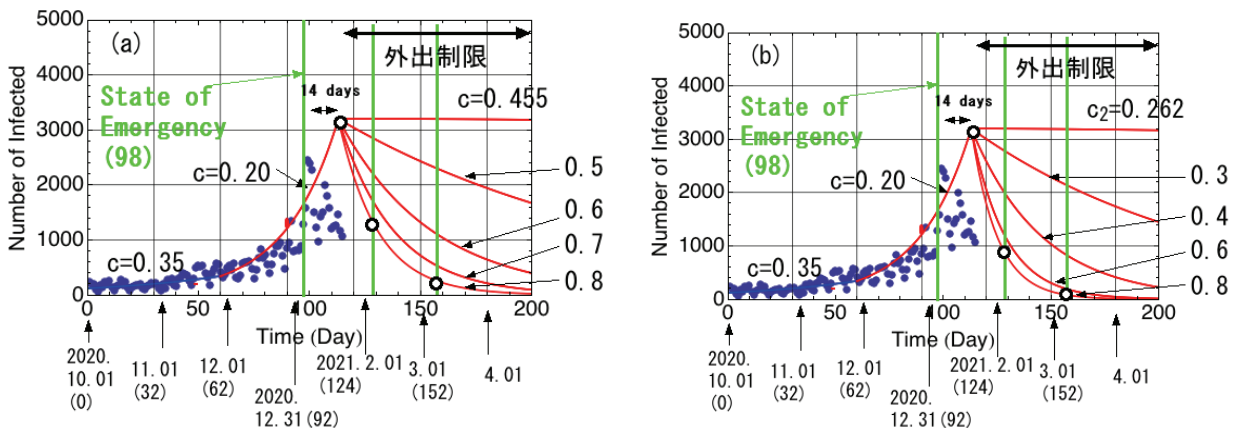


図 8 外出制限の式に (a)  $(1-c)$  を用いた場合，(b)  $(1-c_2)^2$  を用いた場合の感染者の減少の様子

#### § 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．これを同時に行う場合について計算する．

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 9-(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 9-(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いといけないことがわかる．さらに制限割合を撤廃した極端な場合でも，図 9-(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をしながら 2 月末には感染者を 0 にできる．

これらの結果より，手洗い，マスク，社会的距離でだいたい  $c=0.2\sim 0.3$  が達成されていると仮定した場合，隔離までの時間平均が 3 日程度が達成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 等の検査を行えば良いかを知ることでもできる．それを § 5 で示すが，結果として全員に 2 日おきに PCR 検査をして陽性だった場合にすぐ隔離すればこれを達成することも可能となる．

また図 9 に示すようにここでは 2 週間の間に単調に増大すると仮定して計算を行ったが，東京の感染者のデータからわかる様に，緊急事態宣言から 2 週間の間には最初急激に増加したが，それからは減少に転じている．図 9 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 検査を多くの方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て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．

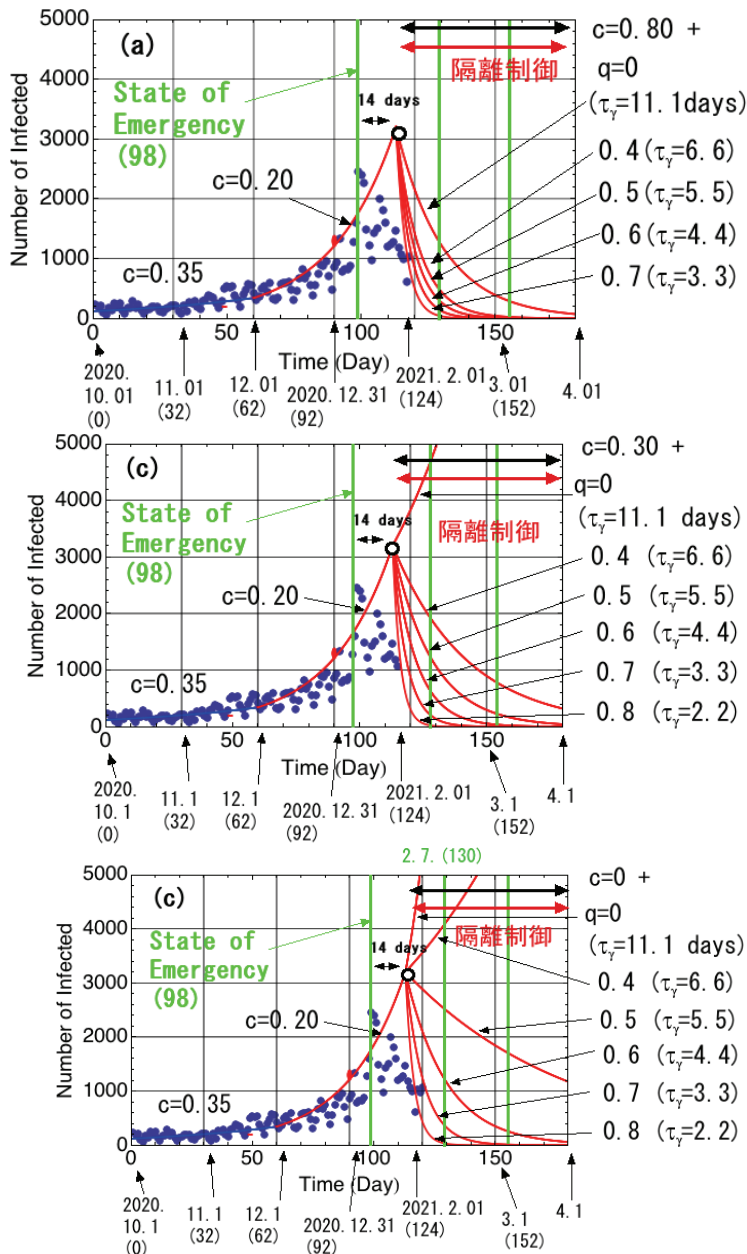


図 9 外出制限と隔離制御を同時に行う場合, (a) 外出制限が 8 割の場合 ( $\tau_f=3.3$  のとき  $R_{\text{off}}=0.1102$ ) (b) 外出制限が 3 割の場合 ( $\tau_f=2.2$  のとき  $R_{\text{off}}=0.257133$ ) (c) 外出制限がない場合 ( $\tau_f=2.2$  のとき  $R_{\text{off}}=0.367$ )

#### § 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までの時間も長くてすむ. その例を計算してみる (図 10). 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  $\tau_f=3.3$  days とすると実効再生産数は  $R_{\text{off}}=0.26999$  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  $\tau_f=2.2$  days のときの  $R_{\text{off}}=0.257133$  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  $\tau_f=2.2$  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 に長くて良いことを意味する.

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

ここで, もし感染力が 1.7 倍大きいイギリス変異株が流行したなら, 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.

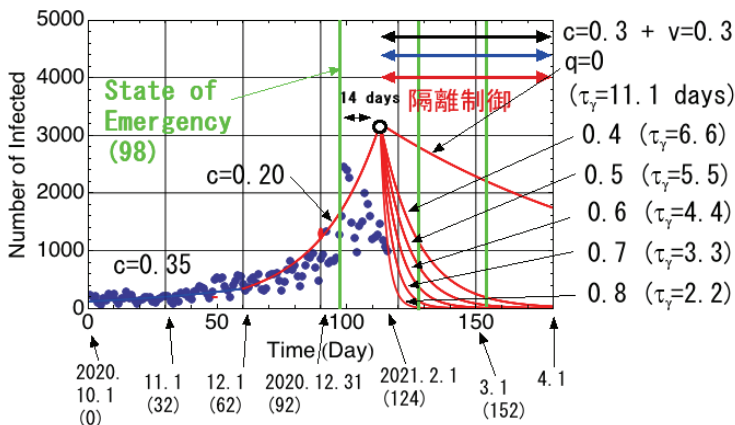


図 10 ワクチン接種，外出制限と隔離制御を同時に行う場合，  
外出制限が3割，ワクチン接種割合が3割の場合  
( $\tau_\gamma=2.2$  のとき  $R_{\text{off}}=0.257133$  とほぼ等しい)

### § 5. 感染性の検査の頻度

以上述べた様に，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するようになっていたが，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[16][17]．従って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，より早く，精度良く検査できる方法があればそれに越したことはない．

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 11-(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 11-(b) に示すよう15分程度で判明する場合で大差がある．検査結果が1日経って判明する場合は1日おきに検査し，同日15分程度で判明する場合は2日おきに検査すればよい．この場合3日で隔離，2日で隔離，1日で隔離と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．このように時間が重要なので，短時間に検査結果がわかる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，国民全員に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倍高い英国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日おきに検査する必要も生じる．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[18]-[21]．

最後にも述べるが，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[22]．

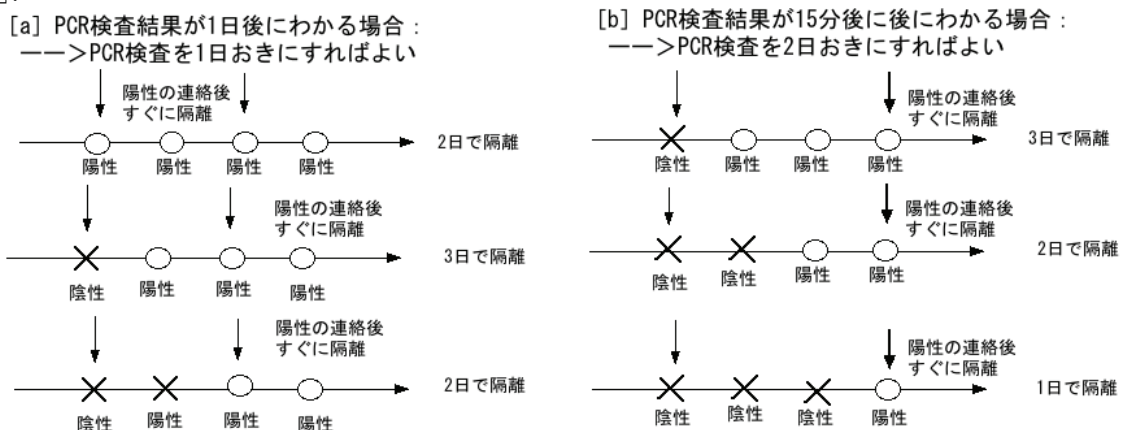


図 11 隔離時間から要請される PCR 検査頻度

## § 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必然である。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る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。自分で計算したことがない限り正直に言って将来を想像することは意外と難しい。従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 12-(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 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。従って、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 12-(b) に示す。ワクチン接種率を直線で仮定している。感染者数は最初は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 (5) 式より計算できる。  $S(t) \sim 1$  のとき

$$R_{eff} = S(t)\beta_0\tau(1-c)(1-v) = 1 \quad \rightarrow \quad v = 1 - \frac{1}{\beta_0\tau(1-c)} = 1 - \frac{1}{0.1653 \cdot 11.1 \cdot (1-0.3)} = 0.22$$

これより、この場合ワクチンの効果を上げるには 22% 以上の人が接種しなければいけないことがわかる。また 1 ヶ月以上待たなければその効果は見えにくい。なお減少に転じるのは 3 ヶ月程度かかることもわかる。

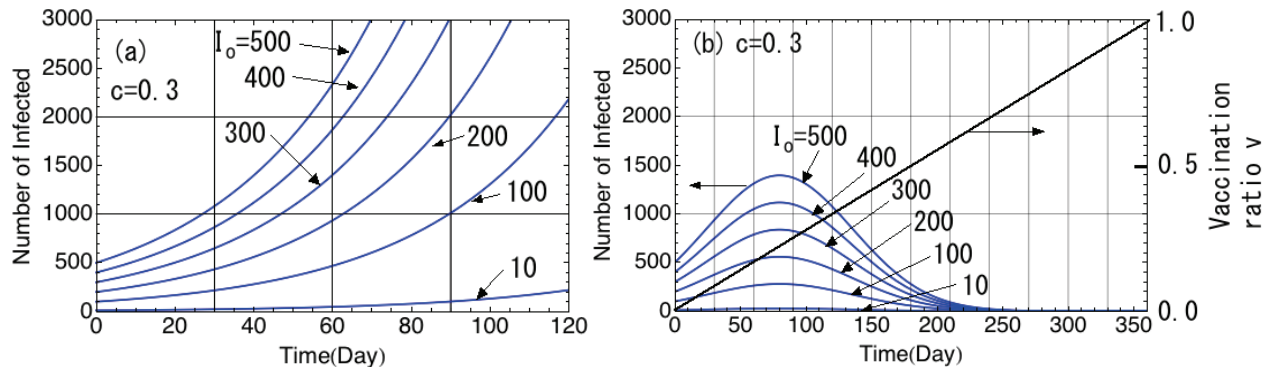


図 12 現在流行のウイルス株の場合 ( $R_0=1.83$ )

(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)

もし感染率が 1.7 倍高いイギリス変異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 13-(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

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

感染者の初期値  $I_0$  が多いと、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、上と同様にワクチンを 1 年間かけて 100% まで接種する場合の感染者数の変化を図 13-(b) に示す。感染者数の増加が減少に転じるには 2 倍の 4 ヶ月ほどかかり、その時の接種率は (5) 式より約 36% である。外出制限割合を増加させるともちろん感染者数は減少するが 8 ヶ月ほどの長期にわたるので、実際には困難であろう。

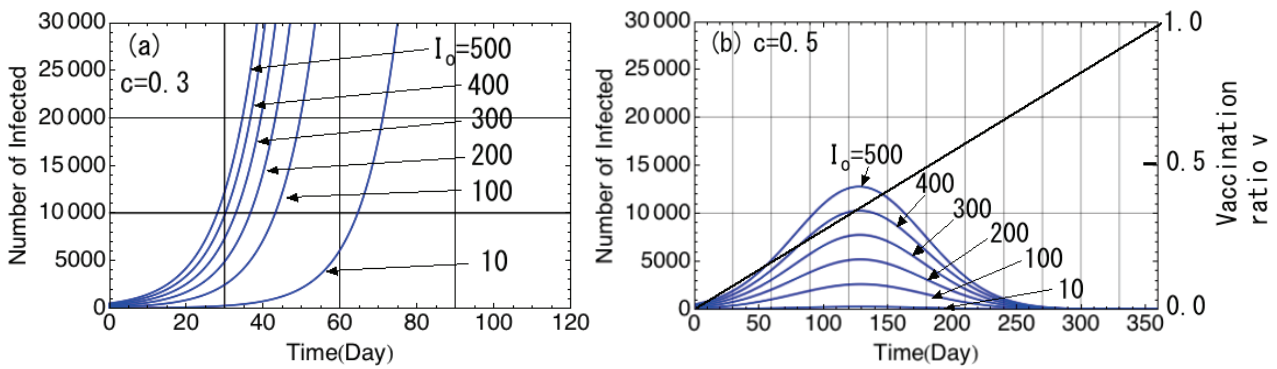


図 13 感染率 1.7 倍のイギリス変異株の場合 ( $R_0=1.83 \times 1.7=3.12$ )  
 (a) 外出制限を  $c=0.3$  の場合の感染者数の初期値依存性,  
 (b) 外出制限  $c=0.5$ , ワクチン接種割合  $v$  を 1 年かけて 100% にした場合の感染者数の初期値依存性  
 (注: どちらの場合も積極的隔離制御は行っていない  $q=0$  の場合である)

感染者の初期値  $I_0$  が 100 人程度の場合, 図 14-(左列) 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 割程度の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-(右列) 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左列と右列では 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.

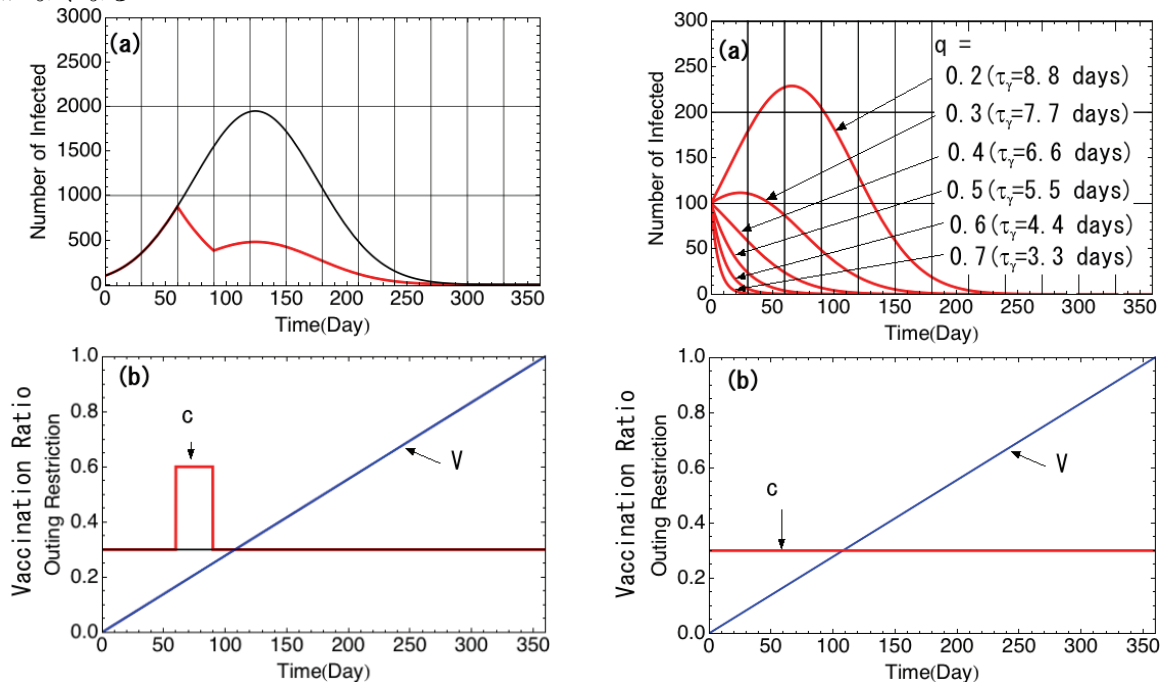


図 14 感染率 1.7 倍のイギリス変異株の場合  
 (左列) (a) 外出制限  $c=0.3$ , ワクチン接種割合  $v$  を 1 年かけて 100% にした場合の感染者数  
 黒線は外出制限一定の場合, 赤線は外出制限をパルス的にかけた場合  
 (b) 外出制限  $c=0.3$ , ワクチン接種割合  $v$  の時間変化  
 (隔離制御は行っていない  $q=0$  の場合である)  
 (右列) (a) 外出制限  $c=0.3$ , ワクチン接種割合  $v$  を 1 年かけて 100% にした場合の感染者数  
 の隔離時間依存性  
 (b) 外出制限  $c=0.3$ , ワクチン接種割合  $v$  の時間変化

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 回接種することが考えられ, またウイルスの変異に対する効果も未知数である. 従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なければならない. しかし感染症制圧の王道である直ぐに効果が現れる隔離制御を行うと直ぐに終息に向かうことが理解できる.

## § 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

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

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を起こせばかえってそれで感染を広げるといった矛盾もあり、また、経済を毀損させるという大きな弊害もある[23]。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 モデルの第 2 式の類似性に基づくと、隔離項の回復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唯一の方法である。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様に、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、 $q \rightarrow 1$  として短時間に隔離して、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[24]。早期発見、早期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、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った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。理想的には全国民を 2 日おきに検査等をすれば良い。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あろうし、そのような取り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[25][26]。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[18][27]。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[25][27]。

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はないかと考えられる。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。「With 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英国の変異株や南アメリカの変異株が見出され、さらに南アメリカの変異株には現在開発されているワクチンも効果がないという説まで出ている。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、本論文で明らかなのは、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[28]、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 倍の英国変異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、陽性者を見つけ出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[29][30]。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[31][32]。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。
- (4) 特に全体的に感染者数が減少してきた場合、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[33]-[37]。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 検査方法をこれを機に確立するとよい。

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」2020. 5. 19.  
<http://www.qpn.kyushu-u.ac.jp/lab7/COVID-19-Mitarai-2020-0519.pdf>
- [2] Osamu Mitarai and Nagato 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 NIFS report : NIFS-1128 Osamu Mitarai and Nagato Yanagi "Suppression method of COVID-19 infection by isolation time control based on the SIR model and the analogy of nuclear fusion research" Dec. 01, 2020 <https://www.nifs.ac.jp/report/NIFS-1128.pdf>
- [3] Kermack, W. O. and McKendrick, A. G. (1927).「Contributions to the mathematical theory of epidemics -I」, Proceedings of the Royal Society Series A, 115, 700-721.
- [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(2006). 特集「予測と発見」 第 54 巻 第 2 号 461-480
- [5] 稲葉 寿, 「微分方程式と感染症数理疫学」数理科学, NO. 538, APRIL 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 Vol. 8, No. 2, 082101 (2020 年 5 月号)
- [8] 牧野淳一郎、科学 (岩波書店) 90 (2020) 428.
- [9] Mitarai, O., and Muraoka, K., 1997, Ignition Analyses for Burn Control and Diagnostics Developments in ITER, Nucl. Fusion, Vol. 37, 1523-1540
- [10] Mitarai, O., Matsuura, H., Omori, T., et al., 2018, Ignition Studies of D-<sup>3</sup>He Spherical Tokamak Reactor, Fusion Engineering and Design, Vol. 136, Part A, 82
- [11] Liu, Y., Gayle, A. A., Wilder-Smith, A, and Rocklöv, J., 2020, The reproductive number of COVID-19 is higher compared to SARS coronavirus, Journal of Travel Medicine, 1-4 doi: 10.1093/jtm/taaa021
- [12] Liu, T., Hu, J., Kang, M., et al. ,2020, Transmission dynamics of 2019 novel coronavirus (2019-nCoV), bioRxiv 2020.
- [13] Toyokeizai online, 2020, Coronavirus Disease (COVID-19) Situation Report in Japan, <https://toyokeizai.net/sp/visual/tko/covid19/>

- [14] Okumura, H., 2020, COVID-19, CSV data,  
<https://oku.edu.mie-u.ac.jp/~okumura/python/COVID-19.html>
- [15] 文献 [2] の Fig. 4-(d) と Fig. 9 のグラフを計算した Mathematica プログラムは最近 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>
- [16] Dickens, B.L., Koo, J.R., Wilder-Smith, A., Cook, A.R., 2020, "Institutional, not home-based, isolation could contain the COVID-19 outbreak", Published Online April 29,  
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31016-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31016-3)
- [17] Long, Q-X, Tang, X-J., Shi, Q-L., et al., 2020, Clinical and immunological assessment of asymptomatic SARS-CoV-2 infections, NATURE MEDICINE | [www.nature.com/naturemedicine](http://www.nature.com/naturemedicine)  
<https://doi.org/10.1038/s41591-020-0965-6>
- [18] Michael J. Mina, Roy Parke, and Daniel B. Larremore, "Rethinking Covid-19 Test Sensitivity - A Strategy for Containment", The New England Journal of Medicine November 26, 2020 e120(3)  
 This article was published on September 30, 2020, at NEJM.org. DOI: 10.1056/NEJMp2025631
- [19] Daniel B. Larremore, Bryan Wilder, Evan Lester, et al., "Test sensitivity is secondary to frequency and turnaround time for COVID-19 screening", Sci. Adv. 2021; 7 : eabd5393, 1 January 2021 doi: <http://advances.sciencemag.org/content/7/1/eabd5393>
- [20] Xi He1, Eric H. Y. Lau, Peng Wu, et al., "Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19", NaTure MEDICINE, VOL 26, MAY 2020, 672-675, doi:  
<https://doi.org/10.1038/s41591-020-0869-5>
- [21] Elizabeth T Chin, Benjamin Q Huynh, Matthew Murrill, 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>. this version posted June 22, 2020.
- [22] Leon Mutesa, Pacifique Ndishimye, et al., "A pooled testing strategy for identifying SARS-CoV-2 at low prevalence" Nature, Published online: 21 October 20, doi:  
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2885-5>
- [23] Mark Bognanni, Doug Hanley, Daniel Kolliner, et al., "Economics and Epidemics: Evidence from an Estimated Spatial Econ-SIR Model" July 2, 2020. <http://perseus.iies.su.se/~kmitm/covid.pdf> (accessed Sept 16, 2020).
- [24] Emilia Vynnycky, Richard White "An Introduction to Infectious Disease Modelling", Oxford University Press (2010)
- [25] 徳田安春, 「ゼロコロナを目指すための検査戦略」科学, 岩波書店, 2021年2月号, Vol.91.No.2.
- [26] Yasuharu Tokuda, Kenji Shibuya, Kazumasa Oguro, "Priority of SARS-CoV-2 test, trace, and isolation in Japan", J of General and Family Medicine, 2021;22:1-2. DOI: 10.1002/jgf2.409
- [27] Kazuki Shimizu, Keita Kondo, Yasuhiro Osugi, et al., "Early COVID-19 testing is critical to end the pandemic", J of General and Family Medicine, 2021;00:1-3, DOI: 10.1002/jgf2.420
- [28] Christie Aschwanden "Why Herd Immunity for COVID is probably impossible?", Nature Vol 591. 25 March 2021
- [29] Paula Jendryn, Claudia Schulz, Friederike Twele, et al., Scent dog identification of samples from COVID-19 patients - a pilot study, BMC Infectious Diseases (2020) 20:536,  
<https://doi.org/10.1186/s12879-020-05281-3>
- [30] Dominique Grandjeana, Riad Sarkisb, et al., Detection dogs as a help in the detection of COVID-19 Can the dog alert on COVID-19 positive persons by sniffing axillary sweat samples ? Proof-of-concept study, bioRxiv preprint doi: <https://doi.org/10.1101/2020.06.03.132134>. this version posted June 5, 2020. The copyright holder for this preprint
- [31] Dyani Lewis "CONTACT-TRACING APPS HELP TO REDUCE COVID INFECTIONS", Nature, Vol591, 4 March 2021, 19
- [32] Ballouz, T. 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 <https://doi.org/10.1101/2020.12.21.20248619> (2020).
- [33] Tuija Poyry, Mirja Stenvik, and Tapani Hovi, Viruses in Sewage Waters during and after a



- Poliomyelitis Outbreak and Subsequent Nationwide Oral Poliovirus Vaccination Campaign in Finland, *Applied and Environmental Microbiology*, Feb. 1988, p. 371-374
- [34] Gertjan Medema, Leo Heijnen, Goffe Elsinga, Ronald Italiaander, and Anke Brouwer, Presence of SARS-Coronavirus - 2 RNA in Sewage and Correlation with Reported COVID-19 Prevalence in the Early Stage of the Epidemic in The Netherlands, *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2020, 7, 511-516
- [35] Gemma Chavarria-Miró, Eduard Anfruns-Estrada, Susana Guix, et al., Sentinel surveillance of SARS-CoV-2 in wastewater anticipates the occurrence of COVID-19 cases, medRxiv preprint doi: <https://doi.org/10.1101/2020.06.13.20129627>. this version posted June 13, 2020
- [36] Eiji Haramoto, Bikash Mallaa, Ocean Thakalib, Masaaki Kitajima, First environmental surveillance for the presence of SARS-CoV-2 RNA in wastewater and river water in Japan, medRxiv preprint doi: <https://doi.org/10.1101/2020.06.04.20122747>. This version posted June 18, 2020
- [37] Jordan Peccia, Alessandro Zulli, Doug E. Brackney, et al., Measurement of SARS-CoV-2 RNA in wastewater tracks community infection dynamics, *Nature Biotechnology*, Published: online 18 September 2020, |[www.nature.com/naturebiotechnology](http://www.nature.com/naturebiotechnology) <https://doi.org/10.1038/s41587-020-0684-z>

## Recent Issues of NIFS Series

- NIFS-1118 S. Ohshima, S. Kobayashi, S. Yamamoto, K. Nagasaki, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Kado, K. Hashimoto, K. Kasjima, H.Y. Lee, L. Zang, N. Kenmochi, Y. Ohtani, S. Konoshima, and F. Sano  
Observation of a Toroidally Symmetrical Electric Field Fluctuation with Radially Elongated Structure in Heliotron J  
Nov. 20, 2014
- NIFS-1119 S. Yamamoto, K. Nagasaki, S. Kobayashi, T. Mizuuchi, H. Okada, T. Minami, S. Kado, S. Ohshima, Y. Nakamura, F. Volpe, K. Nagaoka, S. Konoshima, N. Shi, L. Zang, N. Kenmochi, Y. Ohtani, and F. Sano  
External Control of Energetic-ion-driven MHD Instabilities by ECH/ECCD in Heliotron J Plasmas  
Nov. 20, 2014
- NIFS-1120 S. Kobayashi, H.Y. Lee, K. Nishioka, Y. Nakamura, S. Nishimura, T. Mizuuchi, S. Kado, K. Nagasaki, H. Okada, T. Minami, S. Yamamoto, S. Ohshima, M. Yokoyama, S. Murakami, K. Watanabe, R. Seki, N. Kenmochi, S. Konoshima, F. Sano  
Parallel flow dynamics and comparison with neoclassical transport analysis in NBI plasmas of Heliotron J  
Nov. 20, 2014
- NIFS-1121 T. Mizuuchi, S. Kobayashi, T. Minami, F. Sano, K. Nagasaki, H. Okada, S. Kado, S. Yamamoto, S. Ohshima, S. Konoshima, L. Zang, H. Y. Lee\*, N. Shi†, N. Kenmochi, Y. Ohtani, K. Hada, T. Harada, Z. Hong, M. Kirimoto, S. Kitani, X. Lu, M. Motoshima, K. Murakami, Y. Nakayama, K. Nishikawa, A. Suzuki, S. Tei, M. Yasueda, Y. Nakamura, Y. Nakashima, N. Nishino, G. Motojima, K. Mukai, R. Seki, Y. Suzuki, K. Tanaka, K. Watanabe, M. Yokoyama, S. Murakami  
A New Operation Regime for High-Density Plasma in Heliotron J  
Nov. 20, 2014
- NIFS-1122 T. Imai, T. Kariya, R. Minami, T. Numakura, T. Eguchi, T. Kato, Y. Endo, M. Ichimura, T. Shimosuma, S. Kubo, H. Takahashi, Y. Yoshimura, H. Igami, S. Ito, T. Mutoh, K. Sakamoto, H. Idei, H. Zushi, K. Nagasaki, F. Sano, M. Ono, Y. Mitsunaka  
Development of Over 1 MW and Multi-Frequency Gyrotrons for Fusion  
Nov. 20, 2014
- NIFS-1123 Y. Nakashima, M. Sakamoto, M. Yoshikawa, K. Oki, H. Takeda, K. Ichimura, K. Hosoi, M. Hirata, M. Ichimura, R. Ikezoe, T. Imai, T. Kariya, I. Katanuma, J. Kohagura, R. Minami, T. Numakura, X. Wang, M. Iwamoto, Y. Hosoda, N. Asakura, M. Fukumoto, A. Hatayama, Y. Hirooka, S. Kado, H. Kubo, S. Masuzaki, H. Matsuura, S. Nagata, N. Nishino, N. Ohno, A. Sagara, T. Shikama, M. Shoji, A. Tonegawa, Y. Ueda  
Development of Divertor Simulation Research in the GAMMA 10/PDX Tandem Mirror  
Nov. 20, 2014
- NIFS-1124 T.E. Evans, K. Ida, S. Ohdachi, K. Tanaka, M.W. Shafer, S. Inagaki, M.E. Austin, Y. Suzuki, E.A. Unterberg, the LHD and DIII-D Experiment Groups  
Comparative Studies of Static Edge Magnetic Islands in DIII-D and LHD  
Nov. 20, 2014
- NIFS-1125 M.W. Jakubowski, A. Kirk, W. Suttrop, K. Tanaka, E. Viezzer, E. Wolfrum, A. Dinklage, C. Hidalgo, S. Kaye, G. McKee, S. Mordijck, O. Schmitz and T.S. Pedersen  
Influence of Magnetic Perturbations on Particle Transport in magnetic fusion devices  
Nov. 20, 2014
- NIFS-1126 S. Nishimura  
A Laguerre Expansion Method for the Field Particle Portion in the Linearized Coulomb Collision Operator  
Sep. 25, 2015
- NIFS-1127 T. Nicolas, K. Ichiguchi  
Development of a 3D non-linear implicit MHD code  
Jun. 13. 2016
- NIFS-1128 Osamu Mitarai and Nagato Yanagi  
To achieve both economic activity and suppression of COVID-19  
--Based on the analogy between the SIR model and the controlled fusion--  
May 23, 2021
- NIFS-1129 御手洗 修, 柳 長門  
先進核融合・物理教育研究所, 東海大学, 核融合科学研究所  
MITARAI Osamu and YANAGI Nagato  
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-- (Japanese only)  
May 23, 2021