

コロナ

医療崩壊を防ぎ、経済を殺さない方法

イスラエルのコンピュータ科学者の提案

ヘブライ大学コンピュータ科学・工学院教授

アムノン・シャシュア

シャイ・シャレヴ＝シュワルツ

令和 2（2020）年 7 月

静岡県立大学グローバル地域センター

特定非営利活動法人 国際変動研究所

はじめに

この報告書の狙いは、イスラエル・ヘブライ大学のアムノン・シャシュア、シャイ・シャレヴ＝シュワルツ両教授の3次にわたる論文、「経済をロックダウンすることなく新型コロナウイルス感染症を封じ込められるか」ほか2本を日本国民に広く知ってもらい、コロナ後の日本社会の再構築に役立ててもらおうところにある。

シャシュア教授は、車の自動運転技術で世界トップを走るモービルアイ（現在はインテルの傘下）の創業者としても知られるコンピュータ・サイエンスの権威でもある。

当然のことながら、シャシュア教授は公衆衛生学や疫学の専門家ではない。それにもかかわらず、ポストコロナ戦略を提言したのはほかでもない。新型コロナウイルスは未知の部分が多く、疫学的な解析だけでは困難に直面しているからだ。感染のピークはいつで、発症していない感染者数が何人なのか、把握する術もない。ロックダウンや緊急事態宣言を解除し、経済活動の自粛を解いた結果がどうなるか、疫学的な計算では見通すことはできないのである。

そのような現状に対して、世界的な自動運転の権威であるシャシュア教授は、お手の物のコンピュータ・サイエンスをフルに使ってモデルを弾き出した。

いうまでもなく、自動運転は安全性と利便性のバランスのもとに成り立っている。シャシュア教授は、事故の可能性をゼロにしたければ、車に乗らなければ良いと言う。しかし、人間は生活のために車に乗らないわけにはいかない。そこで事故の可能性を十分に減らしながら、車をいかに活用できるかということになる。シャシュア教授は、新型コロナウイルスの不確定な要素の中で、計算によって最悪のケースを避けるための条件を導き出す試みに挑戦した。

シャシュア教授はまず、社会を67歳以上や持病を持つ人たちの「高リスク」グループと、それ以外の人たちの「低リスク」グループに分け、「低リスク」グループだけ外出禁止令を解除するモデルを設定した。

普通の日常生活に戻った「低リスク」グループにも感染は広まるが、多くは重症化しないと考えられる。そうした流れの中で、数週間から数カ月かけて多くの人々がウイルスへの免疫を獲得し、感染が広がりにくくなったと判断されれば、高齢者など「高リスク」グループを外出させても危険だとは言えなくなる、というのである。

イスラエルの例で言えば、150万人の「高リスク」グループは一定期間、自宅隔離を続け、750万人の「低リスク」グループは社会に戻ることになる。

イスラエル国内の感染データによれば、「低リスク」グループの致死率 0・01～0.02 パーセントに対し、「高リスク」グループの致死率は 2.2 パーセントと推定される。シャシュア教授は「まるで二つの別の病気に直面しているようだ」とし、若者ら「低リスク」グループが経済を回復させる一方、貴重な医療資源は「高リスク」グループに集中させる仕組みが必要だとしている。

論文「経済をロックダウンすることなく新型コロナウイルス感染症を封じ込められるか」で最も重要なのは、集中治療室（ICU）のベッド数がどれだけあれば医療崩壊を防げるかについての計算だ。

イスラエルの感染状況を踏まえると、10 万人あたり 20 床の ICU ベッドがあれば対応できる計算だ。現在は 10 万人あたり 6 床なので、政府の取り組みによって実現可能な数字だという。

イタリア、スペインなどの多くの死者は医療崩壊によって生じたが、感染者が出て十分なベッド数とそれに対応した人工呼吸器、医療スタッフが備わっていれば生命を救えるという。

むろん、このようなモデルには「低リスク群」でも無防備が原因で感染が拡大すれば一定数の死者は避けられないし、「高リスク」グループをどれだけ社会的に切り離せるかという課題も残っている。集団免疫の有効性も確定した訳ではない。

それでも、シャシュア教授は、各国が国民に外出や経済活動の自粛を促し、感染のピークをゆるやかにする戦略をとっていても、経済が破綻してしまう現状に対して危惧の念を隠さない。そうしたジリ貧の事態に陥らないためには、高齢者はなるべく家にいてもらい、その他の人たちの感染リスクに耐えられるだけの医療態勢を整えた上で経済活動を再開させるのは、合理的な考え方だとしている。

シャシュア教授らは、約 1 年半後のワクチン開発までの対応策としては有効な戦略だと考えている。

＊

この報告書をまとめた 7 月下旬段階で、イスラエルは第 2 波に見舞われ、シャシュア教授らの提案を採用すべきではないかとの思いを強くしている。

イスラエルは 3 月中旬以降、PCR 検査キットの輸入に對外諜報機関モサドを動員するなど、国家を挙げて対策に取り組み、一定の拡大防止を実現した。

しかし、ネタニヤフ首相が 5 月 4 日、「我々は成功を収めた」として段階的な規制緩和に踏み切った結果、一時は 1 日 20 人以下に抑えられていた新規感染者が 6 月から徐々に増加に転じ、3～4 月の「第 1 波」当時の 2 倍以上にあたる 2000 人近くに達している。3～4 月の厳しい規制措置で経済も停滞状況にある。

感染拡大の防止と経済再生を戦略的に捉えたシャシュア教授らの提案が評価の対象となるのは自然の流れと言える。

報告書の最後に、小川和久が一般財団法人経済広報センターの機関誌『経済広報』7月号に執筆した「コロナと企業の危機管理」を収録してある。

その理由は、公衆衛生学や疫学の専門家ではない小川が危機管理の立場から新型コロナウイルス感染症の収束と社会経済活動の再開に向けて、事態収束と社会経済活動という「二兎」を同時に追うのではなく、早急な事態収束を受けた経済活動の再開というステップを戦略的に提示した点で、シャシュア、シャレヴ＝シュワルツ両教授の論文に相通じる点があるからである。ご笑覧いただければ幸いである。

＊

この報告書は小川和久（静岡県立大学特任教授）が主宰する NPO 法人国際変動研究所の事業として刊行したものである。小川和久が企画し、西恭之（静岡県立大学特任助教）がシャシュア教授の許可のもと翻訳作業を行い、小川が監修する形をとった。基本的には E-mail に添付して関係先にお届けし、さらにネット上に公開する形をとったが、紙ベースについては小川と西が所属する静岡県立大学グローバル地域センターの調査研究事業の一環として印刷製本し、関係先に配付するとともに公表した。当方の要望を快く受け入れてくださったシャシュア、シャレヴ＝シュワルツ両教授に厚く御礼申し上げたい。

2020 年 7 月

小川和久（静岡県立大学特任教授） 西恭之（静岡県立大学特任助教）

目次

はじめに	1
目次	4
経済をロックダウンすることなく新型コロナウイルス感染症を 封じ込められるか	5
経済蘇生の道	17
新型コロナウイルス感染症ロックダウン解除の翌日——弱者に注意せよ	27
コロナと企業の危機管理（小川和久）	33
著者略歴	38

経済をロックダウンすることなく新型コロナウイルス感染症を封じ込められるか
Can we Contain Covid-19 without Locking-down the Economy?

(第1論文)

シャイ・シャレヴ=シュワルツ、アムノン・シャシュア

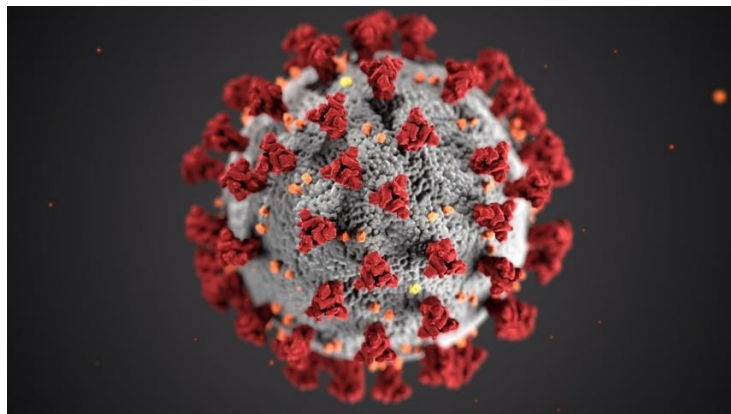
(ヘブライ大学コンピュータ科学・工学院教授)

2020年3月27日

<https://medium.com/amnon-shashua/can-we-contain-covid-19-without-locking-down-the-economy-2a134a71873f>

第1論文の要点（訳者）

- 経済をロックダウンすることなく新型コロナウイルス感染症を封じ込めるため、集団（住民）を、感染した場合に重症化するリスクに基づいて、低リスク群と高リスク群の二つに分ける。
- 高リスク群は、ある最低年齢と既往症によって定義する。
- 先に低リスク群の行動制限を段階的に解除するが、予測される重症者数が医療体制の限界を超えないように管理する。
- 本稿は低リスク群が集団免疫を獲得することを想定しているが、仮に集団免疫の可能性が本稿の想定より低くても、重症化リスクに基づく選択的隔離のモデルは、ワクチンと治療薬が手に入るまでの時間を稼ぐ方法として期待できる。



新型コロナウイルスを電子顕微鏡で撮影し着色した画像（米 CDC 作成）

（謝辞）著者はヘブライ大学コンピュータ科学部教員各位およびピーター・バートレット教授、ニル・フリードマン教授、カトリナ・リゲット教授、ナティ・スレブロ教授、エルヴェ・ベルコヴィエ教授、レナナ・エイタン博士から、前稿についていただいたコメントとご意見に感謝申し上げたい。

本稿では、集団（住民）を高リスク群と低リスク群に分け、リスクに基づく選択的隔離モデルの分析を提示する。低リスク群が集団免疫を獲得するまで、高リスク群を隔離するが、果たしてこのモデルは安全なのか、つまり、低リスク群の重症者数（生命維持装置などによる高度な集中治療を必要とする患者の人数）を、医療体制の限界以下に抑えられるのか。この問題に取り組む。

はじめに

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）流行への対策は、次の三つのモデルを検討することができる。

1. リスクに基づく選択的隔離。

集団を低リスク群と高リスク群の二つに分ける。高リスク群を隔離し、低リスク群には、行動制限を段階的に解除することで、管理された集団免疫を獲得させる。管理とは、予測される重症者数が医療体制の限界を超えないようにするということである。低リスク群が集団免疫を獲得すれば、高リスク群の行動制限も段階的に解除することができる。問題は、医療体制を崩壊させないように、低リスク群と高リスク群の行動制限解除を管理することである。

2. 封じ込めに基づく選択的隔離。

陽性者を見つけて全員隔離する。そのためには、感染者の年齢群ごとに「感染力のある時間区間」 $[t_0, t_1]$ を推定したうえで、個別の感染者とその時間内に接触したため感染したリスクのある人を全員、「接触追跡」を用いて割り出し、隔離することになる。また、予測的検査という方法では、他人との接触の多い人を接触追跡によって割り出し、感染検査を行う。

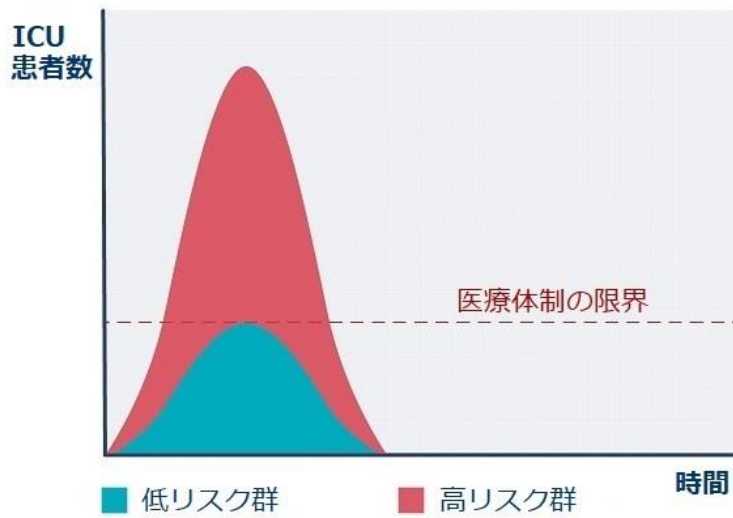
3. ウイルスの流行が制御されるまでの間、全国的（または地域的）にロックダウン（都市封鎖）を行う。

ロックダウンは数週間ないし数か月続く。この方法はもっとも安全だが、それだけでは「第2波」を予防することはできない。

モデル2と3は併用が可能であり、中国とシンガポールで試行された。モデル3は現在、世界的にデフォルト（標準設定）となっており、経済に壊滅的な影響を与えている。

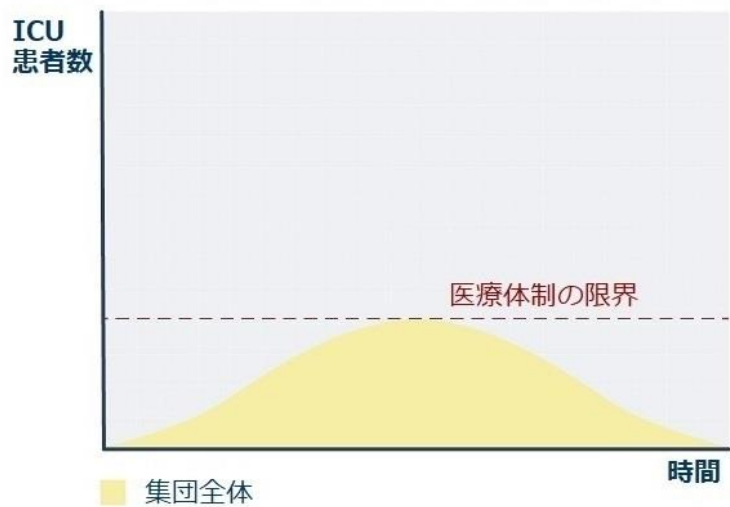
以下では、リスクに基づくモデル1の実行可能性を分析するためのツールをいくつか導き出す。重症者数が医療体制の限界を超えないことを、どの程度の標本抽出と信頼度で保証できるのだろうか。

安全対策をまったく行わない場合



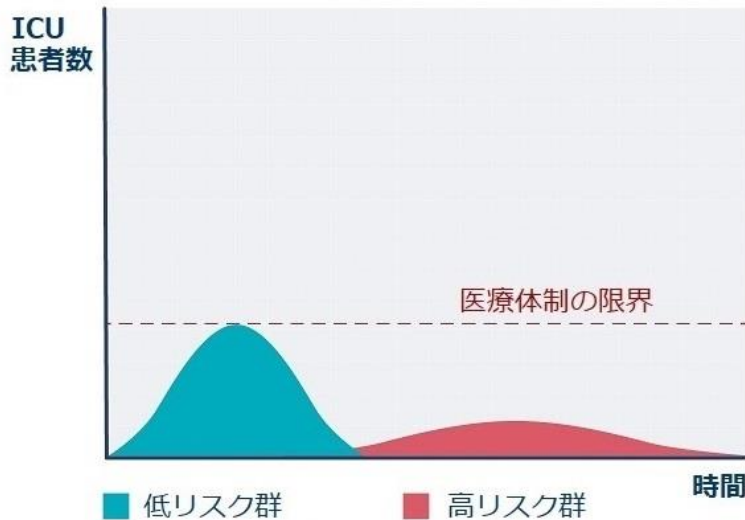
安全対策をまったく行わないと、COVID-19 の流行（ICU 患者数）はこのように推移する。

ロックダウンで集団全体の流行曲線を平らにする場合



全国的ロックダウン（モデル3）を実施すると、COVID-19 の流行（ICU 患者数）はこのように推移する。

リスクに基づく選択的隔離モデル



本稿で提案する、リスクに基づくモデル 1 を実施すると、COVID-19 の流行 (ICU 患者数) はこのように推移する。

リスクに基づく選択的隔離モデル：どうして安全だとわかるのか

高リスク群を定義するとき、ある最低年齢と既往症を条件とすると、一定の説得力が備わる。

具体的に考えるため、最低年齢は、ほとんどが退職している 67 歳と仮定する。そこにおいて 66 歳以下は低リスク群であり、日常生活を送るものの、1) 流行を遅らせること、2) 経済活動の大半を妨げないこと、3) 最終的には集団免疫を獲得することを目的とする人的接触距離の確保 (ソーシャル・ディスタンス)、の手順に従うものとする。

低リスク群が集団免疫を獲得した時点で、高リスク群の隔離を徐々に、安全に解除できるようになる。問題は、低リスク群にウイルスが流行している間、医療体制が崩壊しないことをどのようにして保証するかだ。

医療対応が可能な重症者数の上限を b とする。重症者とは、例えば集中治療室 (ICU)、具体的には人工呼吸器を必要とする患者である。イスラエルの規模の国なら $b = 600$ ほどになる。[脚注 1] リスクに基づく選択的隔離モデルを採用すると仮定し、低リスク群のうち重症者となって ICU を必要とする人数を m_d とする。もし $b > m_d$ なら、モデルは「安全」である。本稿の目的は、 $b > m_d$ であることを保証できるように、 m_d の上界を導き出すことである。低リスク群の人数を m とし、低リスク群の患者が重症化する確率を v とする。すると、低リスク群の重症者数 m_d は、低リスク群の人数 m と重症化率 v の積なので、

$$m_d = m \cdot \nu.$$

したがって、 $b > m_d$ であること（低リスク群の重症者数が、医療対応が可能な重症者数の上限を下回ることを保証するためには、 $\nu < b/m$ であること（低リスク群の重症化率が、低リスク群の人数に対する医療対応が可能な重症者数の比率を下回ることを必要となる）が必要となる。

ここで確認しておく、ウイルス流行の動態と感染症の進行の動態（ICU が必要になる時期と日数）を完全に理解することは極めて困難であり、おそらく多大な研究と時間が必要になる。本稿で提案しているのは、最悪の事態の分析である。悲観論を採用したうえで、それでも医療体制が崩壊するおそれは低いと示すのが主旨である。

本稿では、低リスク群の感染者の全員が発症し、患者全員の潜伏期間は同じで、ICU が必要になる時期と日数も同じだという、現実よりも悲観的な仮定をすでにしている。

本稿のモデルが安全であるための、低リスク群の重症者数 m_d の上界を導き出す作業を続ける。低リスク群の現在の有病率（未知）を p^* とし、低リスク群で今日から 7 日以内に発生する重症者の数を k とする。7 日目より後で重症化する患者はいないと仮定するなら、低リスク群の患者の重症率 ν の近似値は、次のとおり、現在の有病者数（未知） p^*m に対する、今日から 7 日以内に発生する重症者の数 k の比率となる。

$$\nu \approx \frac{k}{p^* m}.$$

繰り返し確認するが、**本稿では最悪の事態を分析**している。実際には 7 日後の重症者の一部は、今日はまだ感染しておらず、明日感染する人かもしれないし、患者が幾何級数的に増えている場合もありうる。

次に、測度集中不等式（訳注：確率変数が、ある値（例えば期待値）から、ある量だけ異なる値をとる確率の、上界・下界を定める不等式）を用いて ν の上界を導き出すことによって、先ほどの近似式を不等式に変換する。一般的な測度集中上界（例えばチェルノフ上界やベルンシュタイン不等式 [脚注 2, 3]）を用いることもできるかもしれないが、ここでは [脚注 5] により、二項分布族に特有の、より小さい上界を用いる。そのため、まず次の補助定理を証明する。

補助定理 1 ある $\delta \in (0,1)$ を定め、全ての整数 k について、 $k > \tilde{k} + 1$ および次の不等式を満たす最小の整数を $\tilde{k}(k, \delta)$ とする。[$\tilde{k}$ は k の上にチルダがある結合文字]

$$\delta \geq \Phi \left(-\sqrt{2 \left(\tilde{k} - (k+1) \left(1 + \log \left(\tilde{k}/(k+1) \right) \right) \right)} \right)$$

Φ は正規分布の累積分布である。 $p^*m > \tilde{k}$ と仮定すると、次の不等式は $1 - \delta$ 以上の確率で成り立つ。(訳注：言い換えると、次の不等式は、低リスク群の患者の重症化率 ν の上界が、現在の有病者数（未知） p^*m に対する、上記の条件を満たす整数 $\tilde{k}$ の比率であることを意味しており、 $1 - \delta$ 以上の確率で成り立つ。)

$$\nu \leq \frac{\tilde{k}}{p^*m}.$$

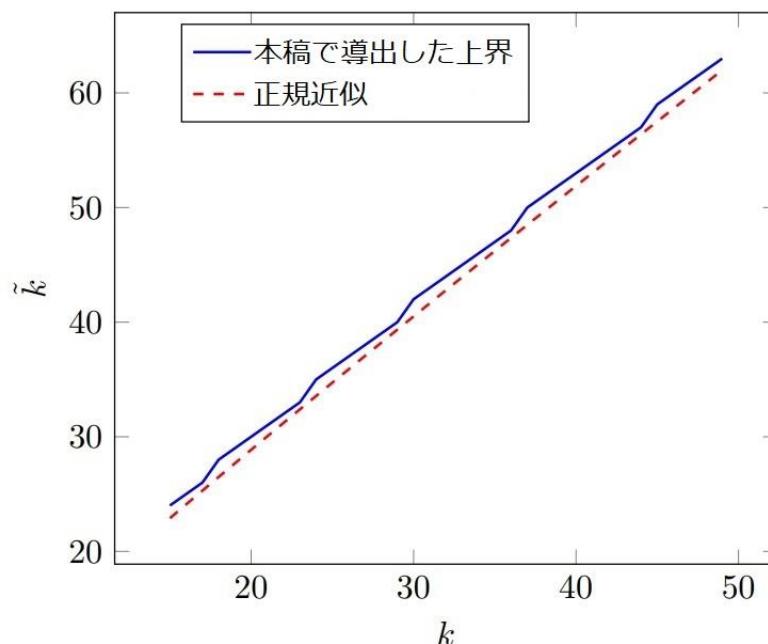
(補助定理 1 終わり)

この補助定理 1 の証明は、付録の補助定理 3 の直接の結果である。例えば $\delta = 0.05$ かつ $k = 15$ なら、 $\tilde{k} = 24$ である。この上界の緊密性 (ν との差が小さいこと) を示すため、二項変数 $Sn \sim \text{Binomial}(p, n)$ について、本稿の場合 $n = p^*m$ かつ $p = \tilde{k}/n$ であり、 n が無限大に近づくと、 $(Sn - pn)/(pn(1-p))^{0.5}$ は正規変数のように振る舞うことに注意したい。したがって、信頼度 $\delta = 0.05$ を確保するためには、極限において $(k - \tilde{k})/\sqrt{\tilde{k}} \approx -1.65$ でなければならない ($\Phi(-1.65) = 0.05$ なので)。それが実現する条件は次のとおり。

$$\tilde{k} - 1.65 \sqrt{\tilde{k}} - k \leq 0 \Rightarrow \tilde{k} \leq \frac{1}{4} \left(1.65 + \sqrt{1.65^2 + 4k} \right)^2$$

(訳注：ここで整理した不等式は、低リスク群の患者の重症化率 ν の上界に関する補助定理 1 の不等式が、95 パーセント以上の確率で成り立つための条件を示している。それが成り立たない事象は、標準正規分布がもつ釣鐘状の確率密度曲線において、左端の 5 パーセントの面積に相当する。確率密度曲線の横軸は z 値（標本と平均値の差の標準偏差に対する比率）だが、左端の 5 パーセントの面積は、 z 値が中央 (0) から左へ 1.65 以上ずれた部分である ($\Phi(-1.65) = 0.05$)。それゆえ、補助定理 1 の不等式が 95 パーセント以上の確率で成り立つための条件は、補助定理 1 で定義した整数 $\tilde{k}$ が、今日から 7 日以内に発生する重症者の数 k に対し、 $(1/4)[1.65 + \sqrt{1.65^2 + 4k}]^2$ を超えないことである。)

次のグラフは、補助定理 1 によって $\delta \leq 0.05$ を保証する $\tilde{k}$ の最小値を、先ほどの不等式に基づいて、 k の関数として示している。2 本の曲線は非常に近いことがわかる。



低リスク群の重症者数 m_d の上界を導き出す作業を続ける。補助定理 1 により、 m_d の上界は、 $1 - \delta$ 以上の確率で次のとおり定めることができる。

$$m_d \leq \frac{\tilde{k}}{p^* m} \cdot m = \frac{\tilde{k}}{p^*}$$

なぜなら、仮に若年層の全員がウイルスに感染しても、重症者数は先ほどの等式の右辺に限られるからだ。むしろ、実際は若年層の全員がウイルスに感染すること、患者全員が同時に重症化することもないので、 m_d はそれよりずっと小さいはずだ。それでも先に述べたとおり、本稿では最悪の事態を分析している。

次に、 p^* の下界を導き出す。そのため、低リスク群からランダムに n 人の標本を抽出し、陽性者数に基づいて p^* の下界を導き出す。

補助定理 2 ある $\delta \in (0, 1)$ と整数 n を定め、全ての整数 r について、 $r - 1 > \tilde{r} > 1$ および次の不等式を満たす最大の整数を $\tilde{r}$ とする。[$\tilde{r}$ は r の上にチルダがある結合文字]

$$\Phi \left(\sqrt{2nD(\tilde{r}/n, (r-1)/n)} \right) \geq 1 - \delta$$

Φ は正規分布の累積分布である。 $D(p, d) = c \log(dp) + (1-d) \log((1-d)/(1-p))$ と定義する。標本の大きさを n とし、 $p^* \in (0,1)$ とし、標本中の陽性者数を r とする。すると、 $p^* > \tilde{r}/n$ が $1 - 2\delta$ 以上の確率で成り立つ。

(訳注：この補助定理の目的は、低リスク群の現在の有病率 p^* の下界を示す不等式が、一定以上の確率で成り立つと証明することである。整数 $\tilde{r}$ は、1) 全ての整数 r (陽性者数) について $r - 1 > \tilde{r} > 1$ であること、かつ、2) 検査した人数 n 、陽性者数 r 、関数 D 、確率 δ について、確率密度曲線の左から $100(1 - \delta)$ パーセントの面積が、 z 値が中央から右へ $\sqrt{2nD(\tilde{r}/n, (r-1)/n)}$ ずれた箇所までの面積を超えないこと、を満たす最大の整数である。その $\tilde{r}$ の、検査した人数 n に対する比率が、低リスク群の現在の有病率 p^* の下界だという不等式は、 $1 - 2\delta$ 以上の確率で成り立つ。)

(補助定理 2 終わり)

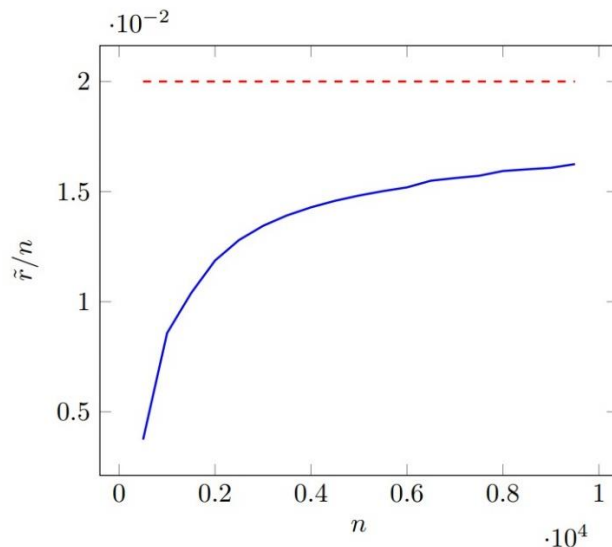
この補助定理 2 の証明は、付録の補助定理 4 の直接の結果である。結局、低リスク群の重症者数 m_d の上界が、次の不等式のとおり、低リスク群の現在の有病率 p^* の下界 $\tilde{r}/n$ に対する、補助定理 1 で定義した整数 $\tilde{k}$ の比率である確率は、 $1 - 2\delta$ 以上である。

$$m_d \leq \frac{\tilde{k}}{\tilde{r}/n}.$$

もし $b > m_d$ (低リスク群の重症者数が、医療対応が可能な重症者数の上限を下回る) なら、この重症者全員に医療対応が可能なので、本稿のモデルが安全であるための十分条件が導き出される。次の不等式のとおり、低リスク群の現在の有病率 p^* の下界 $\tilde{r}/n$ に対する、補助定理 1 で定義した整数 $\tilde{k}$ の比率が、医療対応が可能な重症者数の上限 b を超えないことである。

$$b \geq \frac{\tilde{k}}{\tilde{r}/n}.$$

標本の大きさ n の効果を直感できるように、 $\delta = 0.05$ と定め、 $p^* = 0.02$ と仮定しよう。次のグラフは p^* の下界を n の関数として示す。



標本の大きさ n が 1000 人のとき、下界の計算の効率は 2.3 倍低下し、5000 人のとき 1.25 倍低下することがわかる。

考察と含意

本稿の目的は、リスクに基づく隔離のアプローチを意思決定者が検討する際、ICU を必要とする重症者の数に医療体制が耐えられるのか調査するための、数学的・形式的で緊密な上界と下界を提供することである。

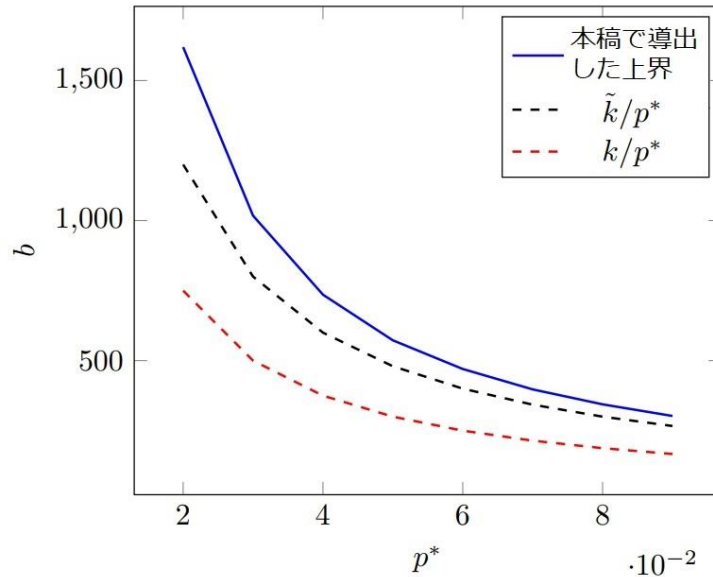
本稿の推論には、高リスク群（重症化率が高くなると疑われる群）を隔離し、それ以外の低リスク群は、人的接触距離を確保する一定の手順の下で、ウイルスを拡散することを許されるという、**選択的隔離の考え**が埋め込まれている（本稿では高リスク群を年齢と既往症で定義したが、他の基準もありうる）。

大前提は、**集団全員の隔離**はそれ自体で解決策となりえず、より管理的な（力づくでない）方法のために**時間を稼ぐステップ**でしかないということだ。

本稿で検討した管理的な段階の目的は、**経済活動を続けながら**、制御された方法で低リスク群に**集団免疫を獲得**させることにある。本稿で取り組んだ問題は、低リスク群の重症者数に医療体制が耐えられるのかどうかを、事前に標本抽出によって予測できるのかという問題である。

イスラエルを例に考える。3月30日現在、ICUに入っている重症者74人のうち、67歳未満の人数 k は 15 人である。現在、低リスク群の有病率 p^* は科学的に推定されておらず、兆候でしかない。次のグラフは、 $\delta = 0.05$, $k = 15$, $n = 5000$ と

いう条件で、 p^* の値が 0.02 以上 0.1 以下のとき、本稿で導き出した m_d (低リスク群のうち重症者となって ICU を必要とする人数) の上界を p^* の関数として描いたものだ。また、 b は医療対応が可能な重症者数の上限、 $\tilde{k}/p^*$ は p^* がわかる場合の m_d の上界、 k/p^* は重症化率の期待値に基づく m_d の近似値である。



注目すべきことに、標本の大きさ $n=5000$ という条件の下では、本稿で導き出した上界はかなり小さい。また、 m_d の範囲はおよそ 400 人から 1500 人だが、それは 10 万人当たり 4 床から 15 床の ICU 病床が必要となることを意味する。平時のイスラエルの ICU 病床数は 10 万人当たり約 6 床なので、この範囲内で追加することは十分可能である。現在の危機では 10 万人当たり 50 床に増やすことすら議論されている。したがって、本稿の分析によれば、低リスク群に集団免疫を獲得させる目的で行動制限を解除することが不合理とはいえない。

さらにいくつか言及すべきことがある。第一に、確率変数 k (低リスク群で今日から 7 日以内に発生する重症者の数) は、高リスク群を年齢や既往症で定義する際の指標として、大いに役に立ちうる。 k が増加すると、必要な重症者用病床数も必ず増加するので、 k ができるだけ小さくなるように高リスク群を定義したい。本稿の例では、67 歳以上を高リスク群として、重症者 74 人の中から既往症のない患者を探した。過剰適合を避けるため、この種の研究には複数の国のデータを用いるのが望ましい。

第二に、リスクに基づく選択的隔離モデルが有益なのは、経済活動を続けるためだけでない。このモデルは、死亡率の高い高リスク群を隔離するので、地域ごとの隔離や接触追跡に基づく隔離よりも、**集団全体の死亡率の抑制を期待できる**。

低リスク群が免疫を獲得した後で、高リスク群の隔離を解除すれば、感染はきわめてゆっくりと広がるので、治療薬またはワクチンが手に入るまで、医療対応で乗

り切れる見込みが立つ。他の選択的隔離モデルはどれも、高リスク群と低リスク群の人が同じ確率で感染するので、仮に重症者数が医療体制の限界を超えなくても、高リスク群の死亡率は、リスクに基づく選択的隔離モデルにおける死亡率を上回るおそれが強い。

第三に、本稿では、どうすれば重症者数が ICU 病床数を超えないのか推定するという意味で、何が医療体制にとって「安全」なのかを重視した。どれほど適切な医療を施しても、重症者全員の命は救えないという事実は、無視した。

低リスク群の死亡率を推定するためには、(1) 低リスク群の人の重症化率、(2) 適切な医療を受けた重症者の死亡率、という二つの確率を推定しなければならない。本稿では(1)の上界と下界を導き出し、(2)は無視した。(2)は本質的に、社会のどの面でも行われている「安全」と「便利さ」のトレードオフという道徳的判断であり、したがって、本稿の範囲を超えるからだ。例えば、乗用車の利用をロックダウン(禁止)すれば、自動車事故をかなり減らし、事故死する人を減らすことができるが、どの社会もそのようなロックダウンを実行しない。同様に、保健医療支出額と患者の生存率には正の相関関係があるが、どこの政府も無制限の支出はしない。

最後に確認しておく、自己隔離をやめることは選択であり、義務ではない。飛行機に乗るのが怖い人が、乗らないことを選ぶように、感染が怖い人は、自己隔離を続けられればよい。高リスク群と低リスク群の両方の人がいる家族も、単に安全性を高めたい家族も、自宅隔離を続けるだろう。

付録 A 数学的証明 (略)

付録 B プール検査による p^* の推定

プール検体の検査とは、 T 人から検体を採取して混合したうえで、ウイルスの痕跡を探すことである。プール検体が陽性なら、検査を受けた人の少なくとも 1 人が陽性である。下記ではプール検体の使用法を簡略化して述べる。

無作為に選んだ T 人のプールにおいて、陽性者数 S_T が 1 人以上である確率を ϕ^* とする。プール検体の検査の定義から、 $S_T \geq 1$ の場合のみ陽性となる。[$\tilde{\phi}$ は ϕ の上にチルダがある結合文字]

$$\phi^* = \mathbb{P}[S_T \geq 1] = 1 - \mathbb{P}[S_T = 0] = 1 - (1 - p^*)^T := \tilde{\phi}$$

したがって、 $\phi^* \geq \tilde{\phi}$ が真なら、次の式も必ず真となる。[$\tilde{p}$ は p の上にチルダがある結合文字]

$$1 - (1 - p^*)^T = \phi^* \geq \tilde{\phi} = 1 - (1 - \tilde{p})^T$$

移項により、 $p^* \geq \tilde{p}$ だとわかる。つまり、 $p^* \geq \tilde{p}$ を証明するには、 $\phi^* \geq \tilde{\phi}$ を証明すれば十分である。

プール検体の検査を行うことの利得は、 $\tilde{p}T \ll 1$ ならはっきりわかる。その場合、近似式 $1 - x \approx e^{-x}$ を用いて近似解 $\tilde{\phi} \approx \tilde{p}T$ を得られる。したがって、 p^* について同じ結論を得るため必要なプール検体の検査回数は、通常の検体の検査回数のおよそ T 分の 1 である。

脚注

1. イスラエルの重症者用病床数は 10 万人当たり約 6 床。
2. S. N. Bernstein. On a modification of Chebyshev's inequality and of the error formula of Laplace. *Annals Science Institute Sav. Ukraine, Sect. Math.* 1, 1924. (チェビシェフの不等式およびラプラスの誤差公式の修正について)
3. S. Shalev-Shwartz and S. Ben-David. *Understanding machine learning: From theory to algorithms*. Cambridge University Press, 2014. (機械学習を理解する——理論からアルゴリズムへ)
4. M. Short. Improved inequalities for the Poisson and binomial distribution and upper tail quantile functions. *ISRN Probability and Statistics*, 2013. (ポアソン分布および二項分布ならびに上方分位関数のために改良した不等式)
5. A. M. Zubkov and A. A. Serov. A complete proof of universal inequalities for the distribution function of the binomial law. *Theory of Probability & Its Applications*, 57(3):539–544, 2013. (二項分布関数の普遍的不等式の完全証明)

経済蘇生の道

The Path for Economic Revival

(第2論文)

アムノン・シャシュア、シャイ・シャレヴ＝シュワルツ

(ヘブライ大学コンピュータ科学・工学院教授)

2020年4月19日

<https://medium.com/@amnon.shashua/the-path-for-economic-revival-4d60d652b381>

第2論文の要点（訳者）

- 優れた効果を備えた希少な資源は、誰にでも等しく使うのではなく、リスクの高い人を守るために使うべきである。
- 重症化リスクの低い人々は、人的接触距離の確保、衛生管理ルール、マスク使用という入手可能で無尽蔵の資源によって守ることで、医療崩壊を防ぐことができる。
- 人的接触距離の確保も、医療資源の配分も、重症化リスクに応じて行うことで、総死者数を抑制しながら経済活動を再開することができる。

本稿では、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）流行によるロックダウン（都市封鎖）からの出口戦略を、リスクに応じた人的接触距離の確保（ソーシャル・ディスタンス）という観点から提案する。その核心は、優れた効果を備えた希少な資源は、集団の全員に等しく使うのではなく、リスクの高い人を守るために使うべきだという認識だ。感染症流行の SEIR モデル（訳注：ある感染症にかかる可能性のある人、感染したがまだ感染力のない人、感染力のある人、かかる可能性も感染力もなくなった人からなる数理モデル。付録 A 参照）を一般化して、リスクの高い人と低い人のいる集団に応用することにより、医療システムの負担の最大値および総死者数の分析を示す。リスクに応じた資源配分と、リスクに応じた人的接触距離の確保を組み合わせることで、経済活動を再開しながら総死者数を減らすことができることを論じる。

はじめに

COVID-19 流行への対策のツールボックス（道具箱）には、人的接触距離の確保、衛生管理、マスク使用など、簡単に実施でき、安価で無尽蔵の手段もあれば、利用可能な量が限られた資源もある。後者には PCR 検査、感染者を探知して隔離するための接触追跡用 IT システム、感染確定者と接触した人を隔離するための質の高い疫学的監視などが含まれる。

こうした**有限の資源**は本質的に**高価**であり、**経験**によってしか**改良**することのできない**前提**に基づいている。例えば、**接触追跡システム**は、(システムでは探知できない) **感染力のある無症状感染者の比率**にも、**市民の協力の持続可能性** (低リスク群の気の緩みおよび患者が症状を報告しないこと) にも**大きく影響**される。したがって、**感染力のある人の半数が無症状で、市民の協力の程度が低い**といった条件の下では、**流行を封じ込める措置の効果は低く、新たな流行もありうる**。

本稿の戦略が取り組む最重要課題は、**ワクチンが入手可能になるまでの間、流行を段階的かつ完全に制御し、同時に経済活動を妨げないために、どのように資源を配分するのか**ということである。

ここで**提案する原則**は、「**漏出**」の影響を受けやすい人々に**資源を集中**することである。漏出とはなんらかの理由で流行の封じ込めに穴が開くことで、その結果として医療体制の需要も死者も増えることになる。イスラエルのデータによると、人工呼吸器患者の 84 パーセントには既往症 (高血圧、糖尿病、心疾患がもっとも多い) があるか、65 歳以上、つまり高リスク群である。したがって、

1. もっとも高価な資源は高リスク群に集中するのが望ましい。
2. ただし、低リスク群における流行封じ込めの漏出が、医療システムへの患者の殺到に至るかどうかは、検討を要する。

本稿の主な**新機軸**は、**人的接触距離の確保、衛生管理ルール、マスク使用**という入手可能で**無尽蔵の資源**を用いることで、**低リスク群の人々を守りながら医療崩壊を防ぐ**ことができるという議論である。さらに、集団が高リスク群と低リスク群からなっており、それぞれの流行封じ込め措置が異なるという状況を分析できるように、**SEIR モデルを発展させる**。

ガイドライン

われわれは論文 [脚注 3] で、医療体制の容量 (人工呼吸器の数) の上界と下界を、測度集中を用いて導き出すための数学的基礎を、信頼区間 (訳注: その範囲に母集団の真の平均値が存在すると、ある確率をもって確信できる区間) を用いて打ち立てた。そのときは、無作為抽出によって低リスク群の感染率を調べたデータがあるということを前提にした。

本稿では、**低リスク群の流行のピーク**において**必要な ICU 病床数** (人工呼吸器患者数) の最大値を、新たな検査を必要としない**既存のデータ**を用いて、信頼区間を示さずに**簡単に計算**する。

ここでは **SEIR モデル** (付録 A で詳述) における基本再生産数 $R_0 = 1.4$ とする。つまり、感染者 1 人から平均 1.4 人が感染する。これは文献に報告されている R_0

のなかでは低いほうである。[脚注 2] 低いほうの値を採用する理由は、本稿で検討する案が、人的接触距離の確保、衛生管理ルール、マスク使用、集会の規模の規制という条件の下、低リスク群の隔離を解除するものだからである。低リスク群から高リスク群への漏出をモデル化する問題には、後段で取り組む。

次のグラフは、SEIR モデルにおける感染力のある人の比率を示している（詳細はグラフに注記した）。流行曲線は釣鐘型であり、そのピークで医療体制の負担がもっとも重い。 R_0 が 1.4 なら、流行曲線のピークでは 1.78 パーセントの人が感染力をもつ。これに、低リスク群の人が人工呼吸器を必要とする確率を乗じて、人工呼吸器の平均使用日数（11 日）に対する平均感染性期間（2.9 日）の比率を乗じると、流行のピーク時には低リスク群の何パーセントが人工呼吸器を必要とするのか計算できる。

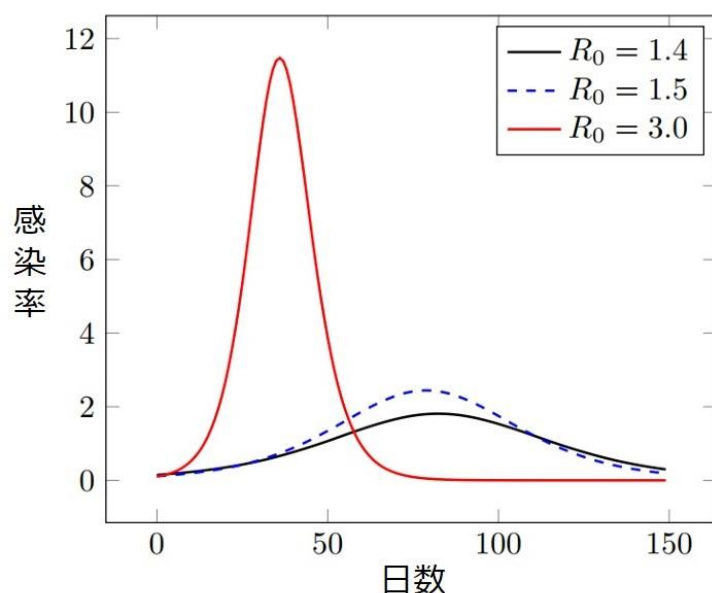


図 1: 感染力のある人の割合を、時間の関数として SEIR モデル（付録 A 参照）に基づいて表した。平均感染性期間は 2.9 日、平均潜伏期間は 5 日とした。

患者が人工呼吸器を必要とする確率は、既存のデータから計算できる。2020 年 4 月 7 日の時点で、イスラエルの人工呼吸器患者 116 人中 19 人が低リスク群だった。その 10 日前には約 5000 人の感染が確認されていた。感染者の半分ほどは無症状なので [脚注 1]、感染者数の下界は感染確認者数の 2 倍となるのは確かだ。さらに、オーストリアで最近行われた抽出検査によると [脚注 4]、実際の感染者数は感染確認者数の 2 倍から 5 倍だった。集団免疫についてより悲観的な 2 倍という比率を採用して、実際の感染者数は 1 万人だったとしよう。感染者の年齢構成から考えると、15 パーセントが 65 歳以上だったといえる。さらに、10 パーセントは 65 歳以下だが既往症があると仮定しよう。すると、無作為抽出に基づく信

頼区間のデータがない現状では、既存の情報から、低リスク群の感染者が人工呼吸器を必要とする確率は、7500 人中 19 人、0.25 パーセントに近いとわかる。感染者が人工呼吸器を必要とする確率は、感染者のリスク群によって決まり、推定が行われた時期とは関係ないということが重要である。

低リスク群の人数は約 700 万人である（総人口 880 万人から 65 歳以上の 120 万人および 65 歳以下で既往症のある 60 万人を引く）。

したがって、低リスク群の流行のピークにおける人工呼吸器患者数は次のとおり。

$$0.0025 \cdot 0.0178 \cdot (11/2.9) \cdot 7,000,000 = 1,181$$

実際の感染者数は感染確認者数の 2 倍を大きく上回るかもしれない。先に触れたように、オーストリアの抽出検査では、この比率は最大 5 倍に上った。その場合、流行のピークにおける人工呼吸器患者は 472 人から 1181 人となる。したがって、もっとも悲観的な前提でも、約 1200 人の人工呼吸器患者に備えればよいことになる。それはイスラエルの現在の医療体制と調達のしくみで十分可能である。

さらに、低リスク群の中で「漏出」によって基本再生産数が少し増えても、対応できないほど人工呼吸器患者が増えるわけではない。例えば、 R_0 が 1.4 から 1.5 に増えた場合、SEIR モデルによると、必要な人工呼吸器の数は約 1600 台に増える。

ウイルス検査による感染確認者数の人口比に比べて、無症状者を抽出して行う抗体検査から推定される感染率が大きいほど、集団免疫の可能性を期待できる。感染率を推定する目的で、無症状者を抽出して抗体検査すれば、集団免疫の可能性を期待できるデータと推定が出るのが、ほぼ確実である。

低リスク群内部の漏出が患者を増やす効果は、高リスク群における漏出が患者を増やす効果より劇的に小さい。その結論が、われわれに利用可能な対策をもたらす。加えて、イスラエルには、もっとも悲観的な前提の下での人工呼吸器患者数の最大値に備える能力がある。

リスク群の間の漏出を分析するため SEIR モデルを発展させる

ここまでは高リスク群を無視して論じてきた。しかし、現実には感染力のある低リスク群の人から高リスク群への漏出も、高リスク群内部の漏出もある程度起きる。付録 B では、二つのリスク群への分割に対応して SEIR モデルを一般化する。そのため、低リスク群内部の感染、低リスク群から高リスク群への感染、高リスク群から低リスク群への感染、高リスク群内部の感染の基本再生産数に、それぞれ $R_{0l,l}$; $R_{0l,h}$; $R_{0h,l}$; $R_{0h,h}$ という値を与える。

先に述べたとおり、低リスク群の中では感染者 1 人から平均 1.4 人が感染するので、 $R_0 I, I=1.4$ とする。低リスク群から高リスク群への感染については、両方のリスク群の人がリスクを理解しているという前提で、 $R_0 I, h=0.02$ とする。例えば、イスラエルの市民は「祖父母に近寄らないように」と言われており、おおむね自発的に従っている。高リスク群から低リスク群への感染は、本稿のモデルにとって重要でないが、対称性のため、これも $R_0 h, I=0.02$ とする。残る課題は、高リスク群内部の漏出に関する合理的な予測を立てることである。所与の条件として、1) 高リスク群はより厳しく人的接触距離を確保しており、2) 高リスク群は高齢者が多く、高齢者は独居者が多いので、 $R_0 h, h<1$ と仮定するのは合理的であり、本稿では 0.7 とする。その結果 [付録 A 図 2]、高リスク群の流行のピークにおいて必要な ICU 病床数は 872 床となる（上記のとおり、低リスク群には別に 1181 床が必要）。

以上をまとめると、実際の感染者数は感染確認者数の 2 倍しかないと悲観的に仮定し、二つのリスク群の間の漏出も、高リスク群内部の漏出も計算した場合、流行のピークで必要な ICU 病床数は 2053 床、イスラエルの人口 10 万人あたり 20 床となる。

利用可能な対策

本稿の対策案は、利用可能な手段を何に集中するのかを変えるのであって、利用可能な手段の種類も量も変えることはない。低リスク群内部の漏出が患者を増やす恐れは小さいので、低リスク群の行動制限は、人的接触距離の確保、衛生管理ルール、マスク使用を条件として解除できる。経済活動と教育システムは、その範囲内で平常に近い状態に戻すことができる。小売業、レジャー産業、外食産業も、制限の下で再開できる。

その一方で、高リスク群の人々は、より厳しいガイドラインに従って人的接触距離を確保することになる。接触追跡のための資源は、主として高リスク群と、彼らを高齢者施設や病院で世話する人々に配分される。高リスク群における漏出は、患者を増やす可能性が大きく、医療体制を崩壊させるリスクがあるので、高価で有限の資源は、高リスク群における漏出の防止を重視して配分するのが望ましい。高リスク群の重症者数は、人的接触距離の確保に関するガイドラインの厳しさを決めるときの重要な基準となる。

死者数については、集団全体に同じ対策を講じるよりも、本稿のように集団をリスク群に分割し、行動制限によって分離するほうが、全体として減るということが重要である。本稿の提案への対案は、ロックダウンを続けるか、それとも集団全体の接触追跡の有効性に基づいて、ロックダウンと解除を繰り返すかしかない。すでに触れたように、接触追跡の成功は市民の協力にかかっている。低リスク群よりも

高リスク群の人のほうが、症状を直ちに報告することに協力的だと考えて間違いないだろう。

イスラエルの低リスク群は、今のところ COVID-19 による死者を 1 人も出していない。本稿の低リスク群は、一定の感染のリスクを意図的に負うのだが、ここで低リスク群の死者数を簡単に計算する。4 月 7 日の時点で低リスク群の人工呼吸器患者は 19 人だったので、低リスク群の感染者の死亡率の下界は、人工呼吸器を必要とする確率の 19 分の 1、 $0.0025 / 19 = 0.00013$ つまり低リスク群の感染者の 0.013 パーセントである。 $R_0 = 1.4$ という所与の条件から、200 日間で低リスク群の約半数 (350 万人) が感染するので [付録 A 図 4]、死者数は 455 人となる。これは実際の感染者数が感染確認者数の 2 倍しかいないと悲観的に仮定した場合であり、この比率が 5 倍なら、死者数は 182 人となる。どの対策が適切か見定めるために比較すれば、イスラエルの交通事故死者数は年間 350 人ほどである。

付録 A SEIR モデル

SEIR モデルは、区画モデルという種類の、感染症の単純な数理モデルである。SEIR モデルは集団を 4 区画に分ける。

- ある感染症にかかる可能性、つまり感受性のある (Susceptible) S 人、
- 病原体に曝露され (Exposed) 感染したが、まだ感染力のない E 人、
- 感染力のある (Infectious) I 人、
- 回復したか (Recovered)、感染期間 (他人への感染力のある期間) を過ぎたか、死亡したため、感受性も感染力もなくなった R 人である。

集団全員の人数は、4 区画の和 $N = S + E + I + R$ である。各区画の人数は毎日変わる。 t 日目の各区画の人数を $S[t], E[t], I[t], R[t]$ で示す。各区画の人数は、次のルールに従って変わる。

- 平均感染期間を τ_i 日とする。SEIR モデルの R は回復、感染期間の経過または死亡の結果、感染力がなくなった人を含むので、毎日、 I の $1/\tau_i$ の人々が R へ移る。それゆえ、次の等式が成り立つ。

$$R[t+1] = R[t] + (1/\tau_i) I[t]$$

- ウイルスに曝露された人が感染力をもつまで、平均 τ_e 日かかるなら、毎日、 E の $1/\tau_e$ の人々が R へ移る。それゆえ、次の等式が成り立つ。

$$I[t+1] = I[t] - (1/\tau_i) I[t] + (1/\tau_e) E[t]$$

- 基本再生産数 R_0 は、感染者 1 人が S の人々だけと会う場合、ウイルスに曝

露する平均人数である。感染者 1 人が S の 1 人と t 日目に会う確率は、 $S[t]/N$ である。それゆえ、感染者 1 人が t 日目にウイルスに曝露する人数は、 $R_0 S[t]/N$ である。感染期間 τ_i 日について考えると、毎日、 I の一人ひとりが、 $R_0 S[t]/N \cdot (1/\tau_i)$ 人をウイルスに曝露することになる。それゆえ、次の等式が成り立つ。

$$S[t+1] = S[t] - I[t] R_0 S[t]/(N\tau_i)$$

- 同様に、曝露されたがまだ感染力のない人については、次の等式が成り立つ。

$$E[t+1] = E[t] + I[t] R_0 S[t]/(N\tau_i) - (1/\tau_e) E[t]$$

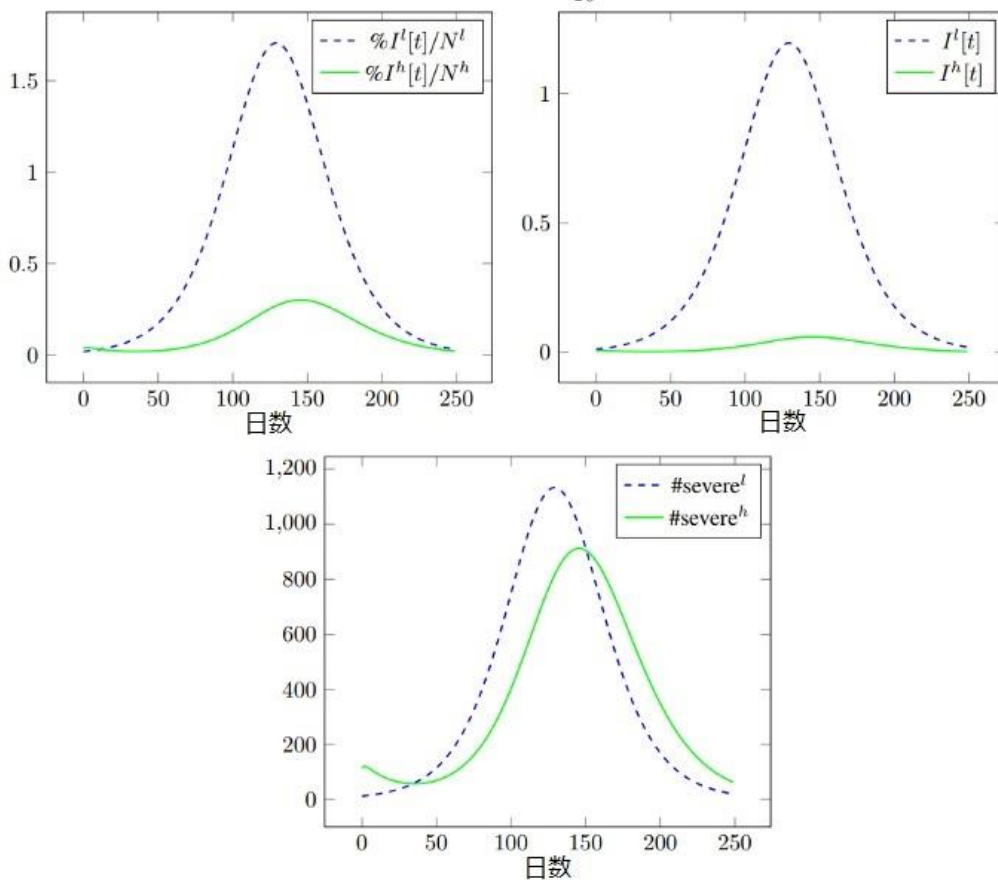


図 2: 高リスク群 h と低リスク群 l のある SEIR モデルのパラメータを $\tau_i=2.9$, $\tau_e=5$, $R_0 l, l=1.4$, $R_0 h, h=0.7$, $R_0 l, h=R_0 h, l=0.02$, $N^l=7,000,000$, $N^h=2,000,000$ と定めた。下のグラフは、高リスク群の 4% と低リスク群の 0.25% が重症 (severe) になるという悲観的な前提に基づく重症者数の推測。

SEIR モデルの意義を直感できるように、図 3 は $\tau_i=2.9$, $\tau_e=5$, $R_0=3.0$ とした場合の $S[t]/N$, $E[t]/N$, $I[t]/N$, $R[t]/N$ の値を示す。

感受性のある人数 S は単調に減少し、感受性も感染力もなくなった人の数 R は単調に増加することがわかる。感染力のある人数 I と、曝露され感染したが、まだ感染力のない人数 E は、急増した後で急減し、釣鐘型の曲線を描く。基本再生産数 R_0 は、この釣鐘型の曲線の尖度（尖っているか平らか）を決める。グラフの内容に即していうと、人数のピークは何人で、何日目そこに達するのかだ。また、基本再生産数は、流行が終わる時点の R 、つまり感染を経験して回復または死亡する人の数も決める。

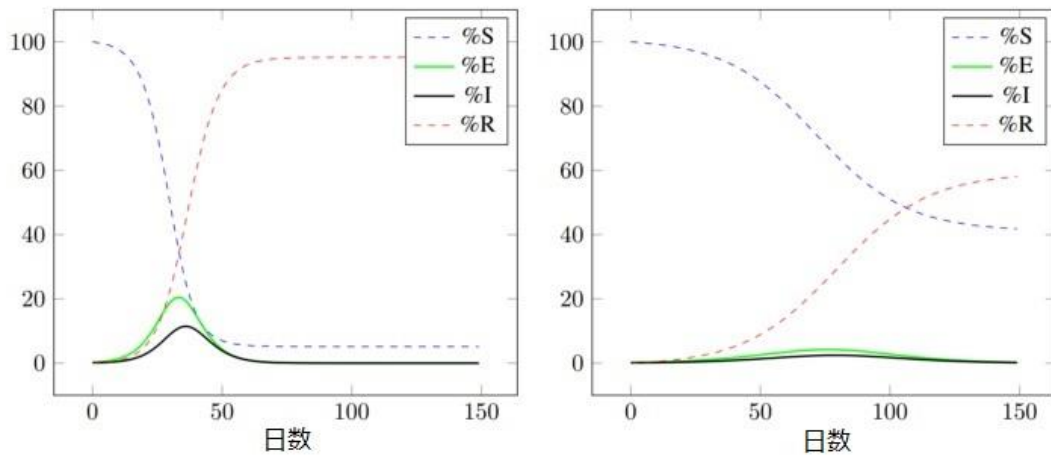


図 3：SEIR モデルのパラメータを $\tau_i = 2.9$, $\tau_e = 5$, 左のグラフでは $R_0 = 3.0$, 右のグラフでは $R_0 = 1.5$ と定めた。

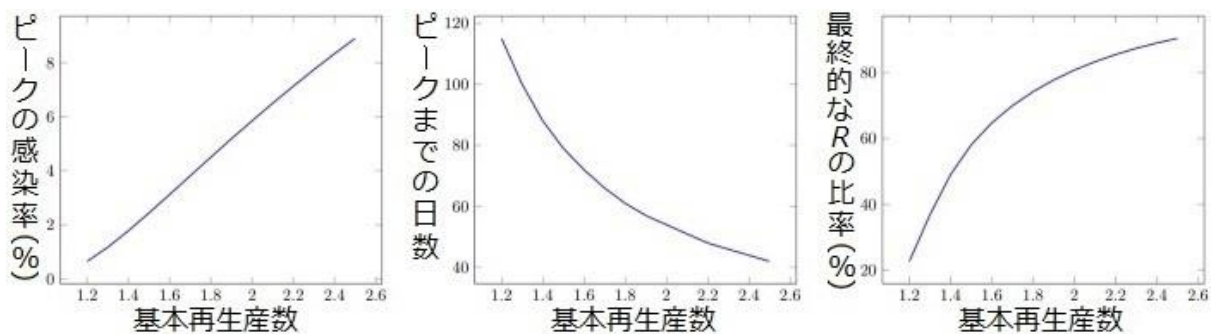


図 4：基本再生産数の効果

SIR モデル： 純粋な SIR モデルには、感受性のある S 人、感染力のある I 人、感受性も感染力もなくなった R 人の 3 区画しかない。各区画の人数は、SEIR モデルに似た公式に従って移り変わる。

$$\begin{aligned} S[t+1] &= S[t] - I[t] R_0 S[t] / (N \tau_i) \\ I[t+1] &= I[t] + I[t] R_0 S[t] / (N \tau_i) - (1/\tau_i) I[t] \\ R[t+1] &= R[t] + (1/\tau_i) I[t] \end{aligned}$$

$I[t]$ の変化量は $I[t+1]-I[t] = \{R_0 S[t]/(N \tau_i) - (1/\tau_i)\} I[t]$ である。 $I[t]$ の変化量がゼロになったときが流行のピークであり、その後、感染者数は時間の経過とともに減る。上記の数式に即していうと、 $S[t]/N = 1/R_0$ となったときが流行のピークである。感受性のない人が集団に占める割合を $\phi[t] := 1 - S[t]/N$ と定義すると、 $\phi[t] = 1 - 1/R_0$ となったときが流行のピークである。この数式は、SEIR モデルに当てはめると誤りとなることに注意したい。もっとも、本稿のように流行の動きを総合的にシミュレートする場合は、この数式によらずに流行のピークを求めることができる。

付録 B 集団を高リスク群と低リスク群に分けた SEIR モデル

以下では SEIR モデルのうち、重症化リスクの高い群と低い群に集団が分かれている派生型について述べる。どちらの群も、付録 A の SEIR モデルのように、感受性のある人の区画 S 、曝露され感染したが、まだ感染力のない人の区画 E 、感染力のある人の区画 I 、感受性も感染力もなくなった人の区画 R の 4 区画に分かれる。低リスク群 l (N^l 人) と高リスク群 h (N^h 人) の合計 8 区画について、 t 日目の人数を $S^l[t], E^l[t], I^l[t], R^l[t], S^h[t], E^h[t], I^h[t], R^h[t]$ と表記する。

人的接触距離を確保するための措置は、低リスク群の人どうしでは緩く、低リスク群と高リスク群の間と、高リスク群の人どうしでは厳しいと仮定する。それをモデル化するため、低リスク群内部の感染、低リスク群から高リスク群への感染、高リスク群から低リスク群への感染、高リスク群内部の感染の基本再生産数に、それぞれ $R_{0l,l}; R_{0l,h}; R_{0h,l}; R_{0h,h}$ という値を与える。

I^l, I^h, R^l, R^h がどのように更新されるかという数式は、付録 A の単純な SEIR モデルに似ている。感受性のある人の区画 S から、曝露された人の区画 E への移動の原因を考えよう。 I^l の人が S^l の人に会うと (これは S^l/N^l の確率で起きる)、毎日 1 人あたり $R_{0l,l}/\tau_i$ 人をウイルスに曝露する。また、 I^l の人が S^h の人に会うと (これは S^h/N^h の確率で起きる)、毎日 1 人あたり $R_{0l,h}/\tau_i$ 人をウイルスに曝露する。同様に、 I^h の人も、感受性のある人をウイルスに曝露する。それゆえ、次の差分方程式が得られる。

$$\begin{aligned}
S^l[t+1] &= S^l[t] - (R_0^{l,l}/\tau_i) (S^l[t]/N^l) I^l[t] - (R_0^{h,l}/\tau_i) (S^l[t]/N^l) I^h[t] \\
S^h[t+1] &= S^h[t] - (R_0^{h,h}/\tau_i) (S^h[t]/N^h) I^h[t] - (R_0^{l,h}/\tau_i) (S^h[t]/N^h) I^l[t] \\
E^l[t+1] &= E^l[t] + S^l[t] - S^l[t+1] - (1/\tau_e) E^l[t] \\
E^h[t+1] &= E^h[t] + S^h[t] - S^h[t+1] - (1/\tau_e) E^h[t] \\
I^l[t+1] &= I^l[t] - (1/\tau_i) I^l[t] + (1/\tau_e) E^l[t] \\
I^h[t+1] &= I^h[t] - (1/\tau_i) I^h[t] + (1/\tau_e) E^h[t] \\
R^l[t+1] &= R^l[t] + (1/\tau_i) I^l[t] \\
R^h[t+1] &= R^h[t] + (1/\tau_i) I^h[t]
\end{aligned}$$

付録 A 図 2 の上の二つのグラフは、低リスク群と高リスク群の感染率と感染者数を示している。パラメータは $\tau_i = 2.9$, $\tau_e = 5$, $R_0^{l,l} = 1.4$, $R_0^{h,h} = 0.7$, $R_0^{l,h} = R_0^{h,l} = 0.02$, $N^l = 7,000,000$, $N^h = 2,000,000$ と定めた。その理由は、人的接触距離を確保するための措置は、低リスク群では緩く、高リスク群では厳しく、低リスク群と高リスク群の間の接触は、マスクや手袋でとくに厳重に防護するからである。

脚注

1. T. John. Iceland lab's testing suggests 50% of coronavirus cases have no symptoms. (アイスランドの検査結果はコロナウイルス感染者の 50 パーセントが無症状だと示唆している)
<https://edition.cnn.com/2020/04/01/europe/iceland-testing-coronavirus-intl/index.html>.
2. Q. Li, X. Guan, P. Wu, X. Wang, L. Zhou, Y. Tong, R. Ren, K. S. Leung, E. H. Lau, J. Y. Wong, et al. Early transmission dynamics in wuhan, china, of novel coronavirus-infected pneumonia. New England Journal of Medicine, 2020. (中国・武漢における新型コロナウイルス肺炎の初期の感染動態)
3. A. Shashua and S. Shalev-Shwartz. Can we contain covid-19 without locking-down the economy? CBMM Memo 104, Massachusetts Institute of Technology, 2020. (経済をロックダウンすることなく COVID-19 を封じ込められるか)
4. COVID-19 Prevalence, SORA, April 10, 2020. (COVID-19 の有病率)
https://www.sora.at/uploads/media/Austria_COVID19_Prevalence_BMBW_F_SORA_20200410_EN_Version.pdf

新型コロナウイルス感染症ロックダウン解除の翌日——弱者に注意せよ

(第3論文)

アムノン・シャシュア、シャイ・シャレヴ＝シュワルツ

(ヘブライ大学コンピュータ科学・工学院教授)

2020年4月27日

<https://medium.com/@amnon.shashua/the-day-after-covid-19-lockdown-need-to-focus-on-the-vulnerable-42c0a360a27>

第3論文の要点 (訳者)

- 死亡率が高く、医療体制を崩壊させるリスクがあるのは、重症化リスクの高い弱者なので、可能なあらゆる手段を用いて弱者を守らなければならない。
- 人的接触距離の確保の態勢を重症化リスクに基づいて分けると、医療体制の崩壊を防ぎつつ、死亡率を5分の1に抑えることができる。
- 高リスク群と低リスク群の接触を完全に断つことは現実的でないので、死者の過半数は、低リスク群の2パーセントが高リスク群を感染させることで生じる。
- さまざまな戦略の長所と短所を比較し、これからの道を指し示すためには、医療体制の容量と全体の死者数の計算に透明性がなければならない。

このシリーズの第2論文では、感染症流行のピークを封じ込めるため必要なICU病床数の期待値を計算する目的で、混合集団のSEIRモデルを導入した。[脚注7] 第1論文では、ICU病床数の緊密な上界と下界を、測度論を用いて導出した。[脚注6] その根底にある知見は、次の条件で集団を低リスク群と高リスク群に分けるべきだということだ。

- 低リスク群の人的接触距離の確保（ソーシャル・ディスタンシング）は、基本再生産数が相対的に「甘く」なるように行う（ $R_0 = 1.4$ と仮定）。
- 高リスク群は、より厳しく人的接触距離を確保して、高リスク群内部の基本再生産数を $R_0 = 0.7$ に抑える。
- 低リスク群から高リスク群に感染する「漏出」を、低リスク群の約2パーセントしか起こさないように、二つのリスク群を隔離する。

このモデルをイスラエルのデータに当てはめると、最悪の想定で必要なICU病床数の期待値は、人口10万人あたり20床となる。

本稿では、われわれのモデルと最近のデータからわかったことを全部まとめて、見通しうる将来において新型コロナウイルス感染症（COVID-19）と共存するための戦略を明示する。

全般的に、ロックダウン（都市封鎖）解除後の社会については、競合する二つの概念（または戦略）がある。

1) 弱者を守る目的のため、集団全体の感染者を最小化し、「流行のピークを下げ」て、弱者への感染力のある人を最小化する。

利用可能な手段は、全面的ロックダウンを除くと、検査、接触追跡、感染者と濃厚接触者の隔離である。この方法の短所は二つある。第一に、50 パーセント以上という無症状感染者の割合の大きさ〔脚注 4, 5〕は、この方法で流行のピークを下げることを妨げるのが、疫学的な必然である。第二に、市民がどれほど協力してくれるのかわからない。とくに、低リスク群の患者は、症状を申告して政府に監視され、行動を命令されるよりも、症状がなくなるまで隠れようとするかもしれない。

2) 弱者に注意する。

年齢と既往症を基準に弱者を割り出し、自己防衛のために厳しく人的接触距離を確保してもらい、その間は国が支援する。この方法の短所は、弱者とその他の人に別々の人的接触距離の態勢を取らせることが可能かということと、厳しい人的接触距離の態勢が長続きするのかということだ。

以下では、別々の人的接触距離の態勢という、2) の概念を掘り下げたい。まず、低リスク群と高リスク群の違いの大きさを示すため、イスラエルと世界のデータからわかっていることを要約する。

- イスラエルの死者のうち低リスク群は 0.5 パーセントである。高リスク群の感染者の死亡率は低リスク群の 100 倍から 200 倍と考えよう。
- 2020 年 4 月 7 日現在、イスラエルの人工呼吸器患者 115 人のうち低リスク群は 19 人である。高リスク群の感染者が ICU 病床を必要とする確率は、低リスク群の 6 倍である。
- スtockホルムとジュネーブの感染者の死亡率は約 0.5 パーセントである。2020 年 4 月 22 日現在、ストックホルムの死者は約 1000 人であり、当局によると人口の約 20 パーセントが感染している。〔脚注 1〕 スtockホルムの人口は約 100 万人なので、感染者の死亡率は 0.5 パーセントとなる。そのころまでにジュネーブでは 191 人が死亡し、ジュネーブ大学病院の抗体検査によると 2 万 7000 人が感染していたので、感染者の死亡率は 0.7 パーセントとなる。
- 死亡率は、集団の年齢の中央値（イスラエル 30 歳、スウェーデン 41 歳、スイス 43 歳）や既往症となる慢性病の分布に影響される。裏付けに乏しいが、幼少年期の BCG ワクチン接種などの影響も議論されている。

イスラエルの人口 900 万人中、低リスク群は 700 万人と仮定し、低リスク群の死亡率を p とする。高リスク群の死亡率を $z \cdot p$ とすると、先に述べた条件から、 $100 \leq z \leq 200$ となるので、

$$\frac{2}{9}zp + \frac{7}{9}p = 0.5\%$$

となる。それゆえ、 $0.01\% \leq p \leq 0.02\%$ かつ $z \cdot p = 2.2\%$ と推論できる。

つまり、**集団全体の感染者の死亡率は 0.5 パーセント**だといっても、低リスク群と高リスク群の死者の**分布は極めて偏っている**。あたかも集団内に**二つの感染症**が流行しており、一方は一部の人がかかる**軽い病気で**、もう一方は別の人がかかる**重病であるか**のようだ。

以上がはっきり示しているのは、**可能なあらゆる手段を用いて「弱者を守る」という、COVID-19 との共存の次の段階のもっとも基本的な原則だ**。死亡率が高く、医療体制を崩壊させるリスクがあるのは弱者だからだ。弱者を守りつつ、極端でない（だが厳しい）**人的接触距離を確保するためのステップ**を、以下に挙げる。

1. 高リスク群を定義する。

基準は**最低年齢および既往症となる慢性病のリスト**である。例えば、2020 年 4 月 7 日のイスラエルでは、COVID-19 患者 148 人が ICU で治療を受けており、そのうち 115 人が人工呼吸器につながれていた。彼らの主な既往症は高血圧（30 パーセント）、糖尿病（30 パーセント）、心疾患（13 パーセント）、ボディマス指数 35 以上の肥満（7 パーセント）だった。最低年齢と既往症は、国や州ごとに異なるだろう。基準は簡潔で市民にわかりやすくなければならない。既往症が高リスク群の基準を満たすのは、おそらく、患者が一つにかかっている場合ではなく、複数にかかっている場合だろう。

2. 高齢者入居施設を守る。

例えばスウェーデンでは、COVID-19 死者の 50 パーセントが高齢者施設入居者だった。入居者と日常的に濃厚接触する**従業員の数は、できるだけ少なく**しなければならない。スウェーデンでは、当局がウイルスへの暴露を減らすために従業員の仕事を集約するまで、入居者 1 人を最大 5 人が世話していた。**従業員は、症状がなくても毎日検査すべきである。来訪者等の接触**については、厳しい人的接触距離の確保、フェイスシールド着用、来訪後の表面消毒をルールとする。

3. 国は高リスク群の人に特別な身分証明書を発行すべきである。

カードには、公共の場で特別な配慮を受ける権利が伴う。行列に並ばなくてよい権利（順番取りと支払いは店員が行う）、厳しい人的接触距離の確保、従業員とやり取りする際の表面消毒、職場での一人用作業スペースなどだ。

4. 高リスク群の人は、在宅勤務する権利と、不可能な場合は COVID-19 危機が終わるまで国の負担で有給休暇を取る権利を認められる。
5. 高リスク群の人工呼吸器患者数を注意深く監視し、それに基づいて人的接触距離の確保に関するガイドラインの厳しさを調節する。

このシリーズの第 2 論文では、人的接触距離の確保に関する条件の下で、低リスク群と高リスク群の人工呼吸器患者数が、時間とともにどのように変わっていくかというグラフを示した。[脚注 7]

第 2 論文 [脚注 7] で言及したとおり、低リスク群も人的接触距離を確保するが、それは経済活動を妨げない程度に行うので、基本再生産数は $R_0 = 1.4$ と仮定する（感染者 1 人が平均 1.4 人に感染させる）。第 2 論文によると、流行のピークを封じ込めるため必要な ICU 病床数は確保可能であり、このサイクルの終わり（低リスク群の 50 パーセントが感染した段階）では、低リスク群の 0.005 パーセントないし 0.01 パーセントが死亡する。

高リスク群について、第 2 論文では、低リスク群の 2 パーセントが高リスク群を感染させ、高リスク群の感染者 1 人は高リスク群の平均 0.7 人（おそらく同居者）を感染させると仮定した。さらに、高リスク群の家庭は感染クラスターになりうると仮定する。ここで低リスク群の人数を X とすると、大まかに言って、高リスク群の感染者数は約 $0.017X$ となり、そのうち死者数は $0.0004X$ となる。

低リスク群と高リスク群が、このように別々の人的接触距離の確保の態勢を取ると、全体の死者数は、低リスク群の人数の約 0.05 パーセントとなる。これと比べるべき数字は、現在の感染者の死亡率 0.5 パーセントであり、全人口の 50 パーセントが感染するまで流行した場合の、全人口に対する死亡率 0.25 パーセントである。したがって、人的接触距離の確保の態勢を重症化リスクに基づいて分けると、医療体制の崩壊を防ぎつつ、死亡率を 5 分の 1 に抑えることができる。死者の過半数は、低リスク群の 2 パーセントが高リスク群を感染させることで生じることが重要である。この感染は、高リスク群と低リスク群の接触を完全に断てば防ぐことができるが、ワクチンが手に入るまで長い間 COVID-19 との共存を強いられるかもしれないので、それはおそらく現実的でない。

むろん、一人ひとりの死は悲劇であり、人の死を軽視するつもりはない。COVID-19 による死と、他の原因による死を防ぐことの相対的な価値は、それぞれの社会が決めることだ。死者数の予測はやりがいのある作業ではないが、さまざまな戦略

の長所と短所を比較し、これからの道を指し示すためには、医療体制の容量と全体の死者数の計算に透明性がなければならない。この論文シリーズほどの透明性をもって出口戦略案が説明されたことは、これまでにない。

脚注

1. H. Ellyatt. Sweden resisted a lockdown, and its capital Stockholm is expected to reach herd immunity in weeks. CNBC, 2020. (スウェーデンはロックダウンを拒否しており、首都ストックホルムは数週間後に集団免疫を獲得するとみられている)
<https://www.cnbc.com/2020/04/22/no-lockdown-in-sweden-but-stockholm-could-see-herd-immunity-in-weeks.html>
2. P. Cauwels. et al. Supplements to COVID-19 confirmed cases prediction. This version: April 15, 2020. (COVID-19 感染確定者数の予測の補足)
https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mtec/chair-of-entrepreneurial-risks-dam/documents/Covid-19/Covid_Supplements_15April2020.pdf
3. Geneva University Hospitals. Covid-19 seroprevalence: First estimate of the prevalence of anti-SARS-CoV-2 IgG antibodies in the Geneva population, 2020. (COVID-19 抗体保有状況：ジュネーブ市民の SARS-CoV-2 に対する IgG 抗体の保有状況を初めて推定)
<https://www.hug-ge.ch/medias/communique-presse/seroprevalence-covid-19-premiere-estimation>
4. T. John. Iceland lab's testing suggests 50% of coronavirus cases have no symptoms. CNN, 2020. (アイスランドの検査結果はコロナウイルス感染者の 50 パーセントが無症状だと示唆している)
<https://edition.cnn.com/2020/04/01/europe/iceland-testing-coronavirus-intl/index.html>
5. D. Karedes. CDC reviewing stunning universal testing results from Boston homeless shelter. April 15, 2020. (CDC はボストンのホームレスシェルターにおける全員検査の驚くべき結果を検証中)
<https://www.boston25news.com/news/cdc-reviewing-stunning-universal-testing-results-boston-homeless-shelter/Z253TFBO6RG4HCUAARBO4YWO64/>
6. S. Shalev-Shwartz and A. Shashua. Can we contain COVID-19 without

locking-down the economy? CBMM Memo 104, Massachusetts Institute of Technology, 2020. (経済をロックダウンすることなく COVID-19 を封じ込められるか)

<https://cbmm.mit.edu/sites/default/files/publications/CBMM-Memo-104-v4.pdf>

Medium サイト上の、このシリーズの第 1 論文とほぼ同じ。

7. S. Shalev-Shwartz and A. Shashua. An exit strategy from the COVID-19 lockdown based on risk-sensitive resource allocation. CBMM Memo 106, Massachusetts Institute of Technology, 2020. (リスクに応じた資源配分に基づく COVID-19 出口戦略)

https://cbmm.mit.edu/sites/default/files/publications/CBMM-Memo-106_0.pdf

Medium サイト上の、このシリーズの第 2 論文とほぼ同じ。

コロナと企業の危機管理

経済広報センター『経済広報』7月号 小川和久

4月から断続的に続いてきた緊急事態宣言の解除を受けて、国民の間に安堵感が広がっている。

確かに、人口100万人あたりの死亡者数は約5人で、ベルギーの700人、スペイン569人などと比べても100分の1近くにとどまっている。

しかし、これは日本政府の新型コロナウイルス感染症への対策が功を奏した結果ではない。

もともと、日本社会はトイレや電車のつり革にまで「抗菌」処理が施され、他国と比較して清潔だったことが幸いしたと考えるべきだ。

本稿では、不幸にして新型コロナウイルスの第2波、第3波に襲われた場合、そして、もっと感染力が強く、致死率も高いウイルスが世界的に流行する事態を視野に、感染を抑制し、経済活動を持続していくため、政府と企業がとるべき対応について整理しておきたい。

まず危機感の問題がある。もし日本政府と国民に「生命の危機」という認識があれば、最初の段階で感染拡大防止と経済活動の両立を求めたりしないはずだ。

安全保障専門家の一員としていえば、今回の新型コロナウイルスは武力侵攻を受けた場合に比べても深刻な脅威である。通常の武力侵攻では、非戦闘員、つまり一般市民が攻撃の対象になることは基本的にはない。砲爆撃による死傷はあっても、市民を標的にすることは国際法で禁じられているし、国際的イメージの点からも、どの国も避けようとする。

しかし、ウイルスは地球上の全人類の隣にいて、いつ牙をむくかもしれない。だから世界の指導者は「戦争」であり「有事」と呼んで危機感をあらわにしたのである。それを「大げさ」とか「感染症と戦争は違う」などと言うのは、危機を自覚していない証拠である。

当然ながら、最優先課題は感染拡大を抑え込むことだ。そのためには、一定期間にわたって国民の行動を規制するロックダウン（都市封鎖など）は避けられない。ところが、政府は外出や経済活動について「要請」を繰り返すことになった。これは自由を奪われることへの国民の不満や、事業主などからの補償要求の噴出を恐れ、忖度し、新型インフルエンザ等対策特別措置法に強制力を備えさせなかったからだ。

しかし、考えればわかることだが、コロナの収束が遅れるほどに医療は崩壊するし、政府は補償措置を繰り返すことになる。経済活動は停滞し、予算編成も税収減

を前提としたものにならざるを得ない。長引くほどに補償金額は細り、財政を圧迫する恐れすら出てくる。これは悪循環そのものである。

こうした問題点を国民に説明し、しばしの不自由を受け入れてもらう。休業などの補償については、激甚災害法と同じ発想で手を差し伸べ、それに上積みすることで理解を求める。規模の大小を問わず、経済活動は大規模災害などのリスクを前提として行われているから、地震や津波を相手に補償を求めることはあり得ない。それを救済するのが激甚災害法の趣旨である。そう説明すれば政府の方針を理解しない国民はいないだろう。これが正攻法だ。

ロックダウンについても、戒厳令を思い浮かべて躊躇するのではなく、日本に適した形で柔軟に考える必要がある。対策の基本は「人と人との接触」を完全に近いレベルで断ち切ることだから、公共交通機関を使った通勤は、許可証を持つ重要インフラ産業をはじめとするエッセンシャルワーカーに絞り、買い物、散歩、軽い運動なども許可証で規制することは避けられない。誤解してはならないのは、これは短期間に限定される物理的な規制措置であり、それ以外の国民の自由を侵すものではない。言論はもとより、集会の自由もネットを使った形で保障され、検察庁法改正問題でも政府に反対の意思を突きつけ、見送りに追い込んだことを忘れてはならない。

悪循環を避け、短期の終息を目指すためには、発想を平時型から有事型に切り替えることもきわめて重要となる。

2月27日、安倍晋三首相が全校休校を要請したとき、『『場当たりの、唐突。不安広がる』愛媛知事が首相の休校要請に苦言 新型コロナ』（2月28日付毎日新聞）といった見出しがマスコミに躍った。専門家の意見を聞いていないという批判もあった。しかし、専門家を集めた会議が、必要なタイミングで明確な方針を打ち出すことができれば、なにも首相が前面に出てくる必要はない。専門家や官僚機構が何も決められず、一方で危機がどんどん進行しているとあれば、首相としては独断と批判されようとも、方針を打ち出さざるを得ないのだ。

臨機応変ということは場当たりの動きの連続にもなる。いきなり新たな動きをするのだから、唐突な印象も生まれてくるだろう。言ってみれば、独断も、場当たりも、唐突も、危機管理としては当然の行動の帰結でもあるのだ。

言うまでもなく、危機管理の要諦は拙速である。必要なことを適切なタイミングで実行できなければ国家国民を救うことができない。これは時間との勝負でもある。なんとしても実現しなければならない目的を断行する。かりに法制度を逸脱した行動が生じたとしても、危機管理の目的を達成すると同時に、生じた問題を可及的速やかに健全化させることができて初めて、成熟した民主主義国家と言える。

万事において平時型がまかり通っている日本の政府と企業には、そうした有事

型の発想ができない。そこにおいてリーダーに求められるのは、自分の組織の内外から有事型の人間を選んで危機対応チームを編成することである。

これは世界に共通することだが、えてして有事型の人間は言動が「尖って」いたり、偏屈な印象から平時型が幅をきかせる時代には陽の当たらない場所にくすぶっていることが少なくない。危機においては、そうした人材を発掘し、活用できるかどうかで組織の運命は変わってくる。

アメリカの第34代大統領になったドワイト・アイゼンハワーは、陸軍士官学校卒業後、30歳から45歳までの16年間で、企業で言えば係長か課長補佐クラスにあたる少佐の階級に留められた。自衛隊でも、防衛大学校出身者なら30代半ばでつく階級である。これを見ただけで、出世とは縁のないコースを歩いていたことがわかる。

このアイゼンハワーに注目し、大抜擢したのはジョージ・マーシャル陸軍参謀総長（後に国務長官、マーシャルプランでノーベル平和賞）だった。アイゼンハワーは大佐だった50歳のときから准将、少将、中將、大將の階級をわずか3年9ヵ月で駆け抜け、1944年12月には陸軍士官学校で10年先輩のダグラス・マッカーサーと並ぶ陸軍元帥に昇進する。企業なら古手の部長があつという間に社長、会長になったようなものだ。そしてアメリカ合衆国のトップである大統領にまでなってしまう。

アイゼンハワーの大抜擢には諸説あるが、自分自身も偏屈な性格のゆえにアメリカ陸軍の中で出世が大幅に遅れた経験を持つマーシャルが、自らの経験から有事に役立つ人間を探し、アイゼンハワーに白羽の矢を立てたとする見方は根拠のないものではない。

トム・リックス著『ザ・ジェネラルズ——第二次世界大戦から今日までの米軍の統帥』によれば、マーシャルは参謀総長に就任した1939年9月から終戦までの間に、1) 常識、2) 専門知識、3) 体力、4) 陽気さと楽観主義、5) 全身にみなぎる活力、6) 抜きん出た忠誠心、7) 強固な決意、という「指揮官としての資質」を示さなかった高級将校を即刻解任している。

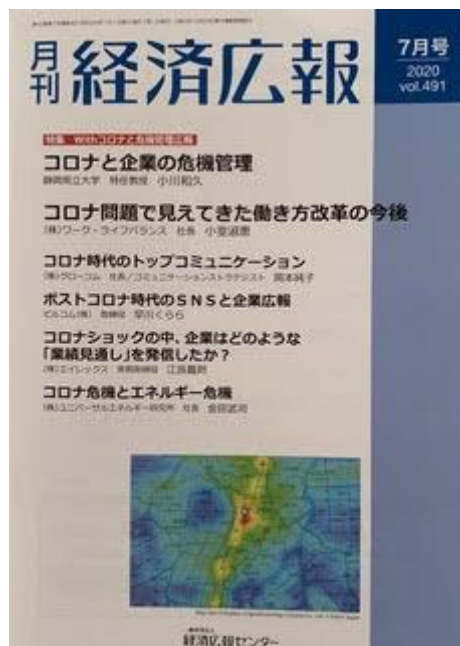
新型コロナウイルス感染症のような緊急事態においては、信賞必罰という言葉が形骸化している日本の組織においてもリーダーがマーシャル型の行動を求められることは言うまでもない。

今回の場合、有事型の組織と人事という点で参考になるのは感染者440人、死者7人（5月20日時点）と抑止に成功している台湾だ。蔡英文政権は中国、そして親中国の国民党との緊張関係の中で、国全体をロックダウン同然にして大きな成果を挙げている。いち早く外国からの入国を遮断し、帰国者や感染者の自宅隔離のケースについては携帯電話のGPS機能を使って管理し、違反者には日本円で

360 万円の罰金を科している。違反者が公共交通機関を利用した場合は 720 万円の罰金というから、違反者が出ないのも道理である。

それを実行することができたのは、一人の素人もいないというほど専門的な知見を持つ人材で政権を固めたからだ。ナンバーツーの陳建仁副総統は 2003 年の SARS（重症急性呼吸器症候群）に対処した公衆衛生の専門家である。

これを見ても明らかなように、リーダーは日頃から有事型の個性を持つ人材をメモしておくことも重要な危機管理だと記憶しておくべきだろう。(5 月 20 日記)



著者略歴

アムノン・シャシュア (Amnon Shashua) コンピュータ科学者、実業家。ヘブライ大学コンピュータ科学・工学院サックス記念講座教授、インテル社シニアバイスプレジデント、モービルアイ社会長兼 CEO (最高経営責任者)。1960 年生まれ。93 年マサチューセッツ工科大学 (MIT) 脳・認知科学博士。96 年ヘブライ大学教員、2003 年教授、07 年からサックス記念講座教授。自動運転のため歩行者・車両・標識などを視認するアルゴリズムとチップ上システムを開発する企業モービルアイを 1999 年創業、2017 年インテルに売却した。2010 年に創業したオーカム社は、視覚障害者が装用できるコンピュータ視覚装置を実用化している。



シャイ・シャレヴ=シュワルツ (Shai Shalev-Shwartz) コンピュータ科学者、実業家。ヘブライ大学コンピュータ科学・工学院教授、モービルアイ社 CTO (最高技術責任者)。2007 年ヘブライ大学コンピュータ科学博士、09 年まで豊田工業大学シカゴ校研究助教授。グーグルと IBM でも機械学習を研究した後、ヘブライ大学教授に就任、モービルアイに参画。2014 年の共著『機械学習を理解する——理論からアルゴリズムへ』(ケンブリッジ大学出版局) は標準的な教科書となった。機械学習の大規模な実用例としての自動運転に惹かれ、その安全性を確保するための数理モデル「責任感知型安全論 (RSS)」を開発した。



**コロナ 医療崩壊を防ぎ、経済を殺さない方法
イスラエルのコンピュータ科学者の提案**

発行日 令和 2（2020）年 7 月 22 日

発行者 静岡県立大学グローバル地域センター、
特定非営利活動法人 国際変動研究所

〒420-0839 静岡市葵区鷹匠 3-6-1 もくせい会館 2 階

電話 (054)245-5600 FAX (054)245-5603

nishi@u-shizuoka-ken.ac.jp

無断転用を禁じます。