

## 行動制限解除の戦略\*

岩本 康志

現在、欧米諸国で都市封鎖から段階的に解除して、著しく縮小した経済活動をどのように回復させていくか、の問題に直面している。経済が回るように行動制限を緩和していくと、同時に感染を広げるリスクがある。経済活動を同じだけ回復させる選択肢のなかで、どれだけ感染リスクを減らすことができるか、という問題を解かなければいけない（同じ感染リスクのなかで、どれだけ経済活動をより多く回復させられるか、という問題と言い換えることもできる）。そのためには、経済的被害と人的被害を同時に考慮して、かつ様々な選択肢を比較する分析枠組みが必要となってくる。政策手段の選択肢を考慮するためには、感染症の流行を説明する SIR モデルに個人の異質性を取り入れたいが、先日公開された Acemoglu et al. (2020) は、複数リスク SIR モデル (Multiple-risk SIR) と呼ばれるモデルを開発し、この研究の方向に道筋をつけ、すでに大きな反響を呼んでいる。また、彼らの得た結果は、若年層の制限を解除し、高齢者を隔離する政策が望ましいというものだ。

以下では、複数リスク SIR モデルの要点のみをとらえられるように非常に単純化したモデルを使って、筆者なりの論点の整理を行っていきたい。まず、同質的な個人からなる SIR モデルによって集団別の行動変容の含意を解説した後に、異質な集団からなる SIR モデルでの政策を検討する。

ここで考えるモデルは、基本的な SIR モデルに基づく。記号が煩雑になることを避けて、総人口を 1 とする。未感染者  $S$  は、感染者  $I$ 、回復者（免疫があり、再感染しないと仮定する） $R$  は、人口シェアとなる。

新規感染者は、未感染者と感染者の接触によって生まれる。人々が感染症予防のことを何も考えていないときの、新規感染者の発生を、

$$\frac{dI}{dt} + \gamma I = \beta SI \quad (1)$$

とする。

それぞれの学問分野がどうやって感染を減らすかを考えている。例えば、未感染者の気道に達した新型コロナウイルスが細胞に侵入する経路を遮断する手段を考えることは生命科学の領域で、経済学者にはまったく出る幕はない。しかし、人々の行動を変容させて接

---

\* 2020 年 5 月 6 日。「岩本康志のブログ」に掲載。2020 年 5 月 7 日に数式を修正。

2020 年 5 月 21 日に(11)式を修正し、その直後の段落も修正した。誤りのご指摘と有益なコメントをいただいた大土井涼二准教授（東京工業大学）に感謝いたします。

触機会を減らすことを考えるには、経済学は役に立つ。(1)式の新規感染者の発生のメカニズムは、経済学でのサーチ理論と構造がよく似ていて、そこで蓄積された経済学の知見を活用することができる(注1)。

(注1) サーチ理論は、労働市場での求職と求人のマッチングをはじめ、様々な経済現象の説明に使われる。2010年のノーベル経済学賞は、サーチ理論の発展に貢献したダイアモンド、モーテンセ、ピサリデイスの3教授に授与された。

個人の自発的行動変容と政策による行動変容で、接触機会を下げることを考えよう。未感染者と感染者のそれぞれが接触機会を減少させる割合を $c_s$ 、 $c_I$ とする。すると、(1)式は、

$$\frac{dI}{dt} + \gamma I = \beta(1 - c_{St})S(1 - c_{It})I \quad (2)$$

となる。簡単なSIRモデルの拡張として、 $\beta$ が時間とともに変化する

$$\beta_t \equiv \beta(1 - c_{St})(1 - c_{It}) \quad (3)$$

が実効再生産数を決めるモデルとなる(注2)。

(注2) 行動変容以外に $\beta$ を変化させる要因については、『実効再生産数が低下する5つの理由』(<http://iwmtys.blog.jp/archives/1077409771.html>)を参照。

政策による行動変容には、個人のタイプを区別しない方式と区別する方式がある。

前者の例には、新型コロナウイルス対策専門家会議が推進した「接触機会を8割削減する」がある。無症状の感染者は自分が感染者かどうかわからないので、非感染者と無症状の感染者を区別して、行動変容を促せない。接触機会を下げる手段を外出自粛だとし、外出しないと感染機会はないという想定を置いてみよう。全員が外出を減らしていると、外出したときに他人と接触する機会もおのずと減っている、というのが(2)式の意味だ。外出を6割減らすと、

$$c_{St} = c_{It} = 0.6 \quad (4)$$

から、

$$\beta_t = \beta(1 - 0.6)(1 - 0.6) = 0.16\beta \quad (5)$$

となって、実効再生産数を8割以上下げることができる。

感染者だと分かった場合には、非感染者と違った行動変容(検疫、隔離、クラスター対策)をとることができる。非感染者とまったく接触させないか、感染対策をしっかりとった医療従事者とのみ接触させることで、

$$c_{It} = 1 \quad (6)$$

とできれば、非感染者に何も行動制限をかけなくても、モデルでの実効再生産数はゼロとなる。ゼロとならなくても、大幅に引き下げれば、大きな効果がある。

この観察をもとに、かりに外出自粛を感染者のみに要請できたとしよう。すると、

$$c_{St} = 0, c_{It} = 0.84 \quad (7)$$

となれば、

$$\beta_t = \beta(1 - 0)(1 - 0.84) = 0.16\beta \quad (8)$$

となり、一律6割の外出自粛と同じだけの実効再生産数の低下を達成できる。両者の違いは、外出自粛の「総量」

$$c_{St}S + c_{It}I \quad (9)$$

である。前者（[4]式の場合）は全体の6割の自粛であるが、後者（[7]式の場合）は、無症状感染者の数がまったくつかめない状態であり、具体的な数値を出すことが難しいが、相当に小さな外出自粛の総量で済む。外出自粛が経済活動の支障になるならば、外出自粛の総量は経済活動への負荷に関する指標になる。また、もしかりに未感染者と感染者に違った自粛水準を設定できるなら、同じ実効再生産数を低下する手段のなかで、一律自粛は経済的負荷を最大化しているということができる。

また、もう一つ重要な数理がある。非感染者と感染者のどちらに行動制限を課すかは、人口比から決まってくる。感染症の流行ではある瞬間の感染者数は非感染者よりも小さいのが通常であるが、頭の体操として、かりに感染者の方が多ければ、感染者を自由にして、非感染者を隔離した方が行動制限の総量は少なくなる。リスク回避の観点から説明するとすれば、「リスクの高い集団の行動を制限せよ」とも見える。この場合のリスクとは、感染拡大のリスクであり、誰と接触するかがランダムな場合、人口の多い側は人口の少ない側と出会う確率が小さく、感染リスクが小さい。人口の少ない側は、人口の多い側と出会う確率が大きくなり、感染リスクが大きい。

ところが、自粛の総量を抑制するために少数派が自粛するという数理は、「多数派の横暴」とも見える。自粛には経済的・心理的負担がともなう。社会のある階層だけが自粛を強いられるとき、その理由がただ少数派だけというのであれば、その階層の社会への不満は高まり、軋轢が生まれるだろう。

個人のタイプを区別しないで一律に行動変容を求めるより、タイプを区別して行動変容を求めた方が政策の自由度があるので、費用を度外視すれば、タイプ別の行動変容の効果が高いことは明らかである。しかし、個人のタイプを識別するために莫大な費用がかかるとすれば、一律の行動変容の方が費用対効果が高くなることがあるので、一概に一律の行動変容が否定されるわけでもない。

政策判断において極めて重要な指標である新型コロナウイルス感染症の致死率については、高齢者と基礎疾患のある個人が高いことがわかっている。基礎疾患のない若年層との致死率の差は、まさに桁が違うほどの差がある。致死率のリスクについては、費用をかけ

ずに識別できる異質な集団がある。そこで、この2つの階層に違った行動変容をとることの帰結を考えるために、リスクの差がある2つの集団がある SIR モデルを考えよう (注 3)。

(注 3) 複数タイプの個人を考える SIR モデルはすでに 3 以上のタイプを考えるようになっているが、ここでは簡単化のため、2 タイプにしてある。

致死率以外のリスクも考慮できるように、リスク差を抽象化して、社会にはタイプ 1 とタイプ 2 の 2 つの集団がいると仮定しよう。集団 1 の未感染者は  $S_1$ 、感染者は  $I_1$ 、回復者は  $R_1$  と表し、集団 2 の未感染者は  $S_2$ 、感染者は  $I_2$ 、回復者は  $R_2$  と表すことにする。それぞれの集団の新規感染者の発生は、(2)式を一般化して、

$$\frac{dI_1}{dt} + \gamma I_1 = \beta_{11}(1 - c_{S_{11},t})S_1(1 - c_{I_{11},t})I_1 + \beta_{12}(1 - c_{S_{12},t})S_1(1 - c_{I_{12},t})I_2 \quad (10-1)$$

$$\frac{dI_2}{dt} + \gamma I_2 = \beta_{21}(1 - c_{S_{21},t})S_2(1 - c_{I_{21},t})I_1 + \beta_{22}(1 - c_{S_{22},t})S_2(1 - c_{I_{22},t})I_2 \quad (10-2)$$

と表される。行動変容を表す変数  $c$  は 8 つもある。すなわち、各タイプの未感染者と感染者のそれぞれに、同じタイプの個人と接触する行動と別のタイプの個人と接触する行動があり、この 8 種類にそれぞれ別の行動変容を促すことができるという設定である。これでは、政策の幅が広がりすぎて、理解が追い付かないので、少し制約を加えてみよう。

それぞれのタイプの行動変容では、タイプ別の接触の機会に差を設けることができないという制約を課す。また、4 つの  $\beta$  はすべて同じ値であるとする。タイプ 1 を低リスク、タイプ 2 を高リスクと考え、人的被害の評価では、タイプ 1 の被害は小さくて、タイプ 2 の被害のみを考慮すればよい、という極端な想定を置いてみる。そこで、タイプ 2 の新規感染者のみを見ると、

$$\begin{aligned} \frac{dI_2}{dt} + \gamma I_2 &= \beta(1 - c_{2t})S_2(1 - c_{1t})I_1 + \beta(1 - c_{2t})S_2(1 - c_{2t})I_2 \\ &= \beta(1 - c_{2t})S_2[(1 - c_{1t})I_1 + (1 - c_{2t})I_2] \end{aligned} \quad (11)$$

となり、行動制限の総量は、

$$c_{1t}(S_1 + I_1) + c_{2t}(S_2 + I_2) \quad (12)$$

である (注 4)。これは、(3)、(9)式で示された同質的な個人の SIR モデルと非常によく似た構造になっていて、そこでの数理がここでも成立する。

(注 4) 免疫のある個人の行動を制限する理由がないので、回復者の行動は制限しないと想定している。

タイプ2の新規感染者を増やすリスクが同じである（[11]式の最後の右辺の値が同じである）選択肢のなかで、行動制限の総量を最小化するものを探してみよう。どちらのタイプが行動制限されやすいかは、以下のような議論で決まる。タイプ1とタイプ2の行動制限の効果と費用の比は、それぞれ

$$\frac{\beta(1-c_2t)S_2I_1}{S_1+I_1} \quad (13)$$

$$\frac{\beta(1-c_2t)S_2I_2}{S_2+I_2} + \frac{\beta S_2[(1-c_1t)I_1+(1-c_2t)I_2]}{S_2+I_2} \quad (14)$$

と計算される。分母（費用に相当）は行動制限の限界的な増加分であり、分子（効果に相当）は、行動制限したときのタイプ2の新規感染者の限界的な減少分である。効果と費用の比が大きいタイプの行動制限を強化し、もう片方の行動制限を緩和することで、同じ新規感染者で行動制限の量を小さくできる。これで、どちらのタイプが行動制限を課されやすいかがわかる。まず、行動制限がタイプ2の感染者と非感染者の両方を減らすことで、タイプ2の行動を制限した方が新規感染者を抑制する効果大きい。(13)式にはない、(14)式の第2項が追加されるためである。つぎに、感染者比率 $I/(S+I)$ が高い方に行動制限を課した方が効果大きい。しかし、どちらのタイプの感染者比率が高いかは、前もっては決められない。タイプ1が人口比で小さく、感染者比率が高い場合には、タイプ1の行動を制限する効果と費用の比が大きくなる可能性もある。いまタイプ2の致死率のみが政策目的となっていて、タイプ2を感染症から守ることが目的なのだが、そのことはただちにタイプ2を隔離する（行動を制限する）ことを意味しないことが、興味深い帰結だ。

行動制限が政治に届く声によって決まるならば、行動制限の総量に現れるウエイトは人口ではなく投票数になるかもしれない。その場合は(13)式と(14)式の「感染者比率」（感染者／投票数）は、若年層が高くなり、若年層の行動制限の効果と「費用」の比が高くなる。こうして、「シルバー民主主義」の帰結として、高齢者の行動を自由にして、若年層の行動を制限することが「政治的最適解」になったりするかもしれない。

(12)式の行動制限の総量は、行動制限による社会の不満を表す指標だが、経済活動の制限の指標とは違うかもしれない。とくに、若年層と高齢者では労働力率が違うので、経済活動への制限の指標は、人口比ではなく、労働力人口比とする方がより優れていると考えられる。そうすると、若年層が労働力人口比で見て多数派であるので、高齢者の行動を制限する方が望ましくなる。

また、数式による展開はしないが、若年層が高齢者との接触機会を若年者との接触機会とは別に抑制することができたとして、高齢者との接触を避ければ、新規感染者に影響する $c$ を大きくして、行動制限の総量に影響する $c$ をそれほど大きくしないという選択がとれるかもしれない。

以上は、非常に簡単なモデル分析に基づくものであり、実際の政策を設計する上では、ここで考慮されていない要因も重要になってくる。様々な論点があるが、(1)政策の実装において注意すべき点、(2)研究の精緻化の方向、(3)政治的・社会的含意、に大きく分けて見ていこう。

(1) 上の問題設定は、瞬間的な新規感染者に焦点を当てており、政策の視野が非常に短期的である。最初の方にのべた「実効再生産数を低下させる」という政策目的の特徴をうまく表現できたとしても、その目的自体が近視眼的であることを正当化しているわけではない。政策目的が近視眼的であることが問題ならば、その特徴を表したモデルから導かれる含意自体も問題になる。

感染症対策は、収束までの長い期間を通しての戦略として考えるべきであり、SIRモデルの初期から収束までの行動変容を政策変数として、やはり通時的な人的被害と経済的被害を考慮の対象とするべきである。上の議論が直観的に正しいように思えても、SIRモデルは非線形微分方程式なので、実際の解を求めて、結果を確かめる方が良い。

そのことに関連するが、(11)式で表現される変化の一瞬間だけ見るという設定では、若年層の行動制限が緩和されることで若年層の感染が増え、彼らが高齢者と接触することで、高齢者の感染リスクが高まる経路が考慮されていない。この経路を遮断するために、実際の政策では、若年層と高齢者の接触を制限することを組み入れる（[11]式のもとになる[10-2]式の $c_{I_{21}}$ を上げる）ことは重要になるかもしれない。

簡単なモデルで示された解が、何も問題なしで社会で実装できるわけではない。じつは、若年層の活動に制限をかけずに、高齢者を保護するという解は、スウェーデンで実際にとられた対策に似ているが、スウェーデンの高齢者の死亡率は高く、対策が手放しで成功と評価されているわけではない。実際には、モデルのように簡単に高齢者の感染リスクを減らせるわけではないという危険性を考慮に入れる必要がある。

(2) モデルの解を現実社会に実装するには、モデル分析でより細かなタイプを考慮する必要がある。Acemoglu et al. (2020)は、年齢階層を3分割した、簡単な3タイプのモデルだが、さらに拡張の余地がある。例えば、行動制限を産業別に考えていく場合には、まったく別のタイプの定式化が必要となってくるだろう。SIRモデルを必要に応じて拡張して経済活動を組み合わせて動学的最適解を求めるという研究に道筋が立つと、その方向のモデル分析のできる経済学者は世界中に山のようにいて、論文を書けば注目される課題に集まってくるのは当然であって、解除が終わってから論文を書いているのは遅いので、今後短期間に、大きく研究が進展しそうだ。

上で説明したモデルでは、新規感染者を生み出す関数形は、 $S$ と $I$ が2倍になれば4倍になるという性質をもっているが、実社会でこれが成立することは限らない。外出自粛の事例では、行動制限の水準が正確に観測されないとすると、実効再生産数の減少が目標通りでなかった場合に、それが行動制限が十分でなかったか、それとも関数形の定式化が誤っていたのかは直ちにはわからない。経済学では、(1)式等で使われている関数形以外の関

数形も考えられていて、Acemoglu et al. (2020)もそれを視野に入れた分析をおこなっている。

政策を設計するには、現実近づけた数値を与える分析が必要になる。ところが厄介なことに、新型コロナウイルスの実際の感染者数の推定が容易でない。データが現実の真の姿から遠ければ、モデルが示す姿も現実から遠いだろう。欧米での行動制限解除に向けて抗体調査の必要性を指摘する声は、経済学者のなかにも多い。

(3) 行動制限解除は政治的・社会的緊張を高める可能性がある。このことは、すでに指摘されている論点である(注5)。ここでのモデルの設定が非常に簡単なことから、この方向には単純な帰結しか出てこないものの、行動制限の総量のみが政策の関心であると、公平の問題が生じてくることは指摘できた。行動制限が社会の一部の階層に課されることを、社会がどう受け止めるかは、社会科学としてのより注意深い分析が必要である。

(注5) 緊急に書いた原稿なので、参考文献の引用がきちんとできていないことをご容赦いただきたい。今後、参考文献を整備した原稿にまとめたいと考えている。

感染症の流行を説明することに特化したSIRモデルに登場する人間は、ウイルスを運ぶ乗り物にすぎない。いくら行動を制限されても文句は言わない。経済学が考える人間像(ホモ・エコノミカス)は人間をとらえ損ねていると散々批判されている経済学者が、SIRモデルに人間味を加えようとしているのは、見方によっては滑稽な風景だ。当然、これまでのご批判通り、経済学者が加えた社会的側面だけでは不十分だろう。しかし、非線形動学体系での最適化問題を扱える研究者を一定規模抱える社会科学の分野はいまのところ経済学ぐらいなので、まずはホモ・エコノミカスへの批判に対応した行動経済学や政治過程を経済学的手法で分析する政治経済学も含めた経済学のなかでの研究の進展が中心になるだろう。その先には、社会科学者全般の参入があってしかるべきだ。

(参考文献)

Acemoglu, Daron, Victor Chernozhukov, Ivan Werning, Michael D. Whinston (2020), "A Multi-Risk SIR Model with Optimally Targeted Lockdown", NBER Working Paper No. 27102, May.

<https://www.nber.org/papers/w27102.pdf>