

# 新型コロナウイルスに関する統計とシミュレーション

M2019SS006 渡辺朱里

指導教員：小藤俊幸

## 1 はじめに

新型コロナウイルスは 2019 年 11 月に中国武漢で発生が確認され、12 月に肺炎症状を引き起こす死亡率の高い疾患として報告された。その後この疾患は世界中に感染が拡大していき、世界保健機関は 2020 年 3 月 11 日に新型コロナウイルスのパンデミックを宣言し、各国で入国制限措置や行動制限措置、都市封鎖を行うなど世界中で大きな影響が見られる。日本国内でも流行し、緊急事態宣言が発表や、全国の小中高で休校、不要不急の外出やイベントの自粛など異例の対応が取られることとなった。1 月 10 日時点で、世界では 9020 万人以上の感染、193 万人以上の死亡、日本国内では 28 万人以上の感染、3800 人以上の死亡が報告されており、現在も感染者数と死者数は増えている。このように新型コロナウイルスの流行は日本国内でも世界各国でも大きな影響を与えたが、こうした各国の政策の決定は、感染者数や死者数、回復者数の感染状況を把握し、感染の予測を行う統計やシミュレーションなどの数理的手法が大きな役割を果たしたと考えられる。今回、数理的手法の有効性を検証することを目標に研究を行う。

## 2 感染症

感染症は接触や飛沫から病原体が体に侵入して発熱や咳の症状が出ることで、歴史は人類が誕生する以前からあったと言われている。過去に感染症が大流行したパンデミックがあったのは 1918 年のスペインかぜ、1957 年のアジアかぜ、1968 年の香港かぜなどがある。このように感染症は数十年おきに世界的に流行しており、その流行と共に SIR モデル、SIS モデル、SEIR モデルなどの感染症の数理モデルが考えられた。新型コロナウイルスや今後また新たに発見される感染症に備えるために、数理モデルの有効性が必要となっている。

### 2.1 今回使用したデータ

本研究では、アメリカのジョンス・ホプキンス大学が Web サイトで公開しているデータを用いる。Web サイトは [5] を参照されたい。

このサイトは 2020 年 1 月 22 日から全世界の感染者情報を公開しており、感染者データは WHO (世界保健機関)、米国疾病予防管理センター、欧州疾病予防管理センター、中華人民共和国国民健康委員会、各国の保健機関やメディアなどさまざまな機関から取得した情報を集計している。また、これらのデータは 1 時間ごとに自動更新されている。

今回の研究では感染者データは、全世界の感染者数、死亡者数、回復者数を使用する。期間は 2020 年 1 月 23 日から 2020 年 11 月 30 日までを用いる。

## 3 新型コロナウイルスの政策

世界で感染が拡大された新型コロナウイルスは、感染の感染を防ぐために各国で様々な対応が実施された。Arthur D. Little Japan によると、その政策は 4 つに分けられる [4]。

### 3.1 4 つの政策

1. デジタル監視
2. 都市封鎖と緩和
3. 緩い規制と啓発
4. 自主性の尊重

1 つ目のデジタル監視は、IT による行動と健康状態の監視により感染者を隔離して、必要に応じて移動規制をする政策である。利用者の健康状態を登録し行動履歴や家族構成から感染リスクを表示して検査や隔離が行われる中国や、クレジットカードの利用履歴や携帯電話の位置情報、監視カメラから各個人の行動を追跡して隔離される韓国がこの政策を採っている。この政策は濃厚接触者の隔離で感染者増加を抑制し短期間で収束することが可能だが、プライバシーの保護が守られにくいことが懸念される。

2 つ目の都市封鎖と緩和は、移動規制とその規制の解除を繰り返して感染者数を制御する政策である。この政策を採っている国はニュージーランドやドイツ、イギリス、イタリアなどがある。この政策は早期の移動規制によって短期間で収束に到達が可能だが、移動規制による経済活動の停滞や規制と解除の反復による経済崩壊が懸念される。

3 つ目の緩い規制と啓発は、クラスター対策等で感染者を制御する一方で一定の経済活動を継続させる政策である。この政策は、日本やオーストラリアが実施している。この政策は感染拡大抑制と経済活動の両立が可能であるが、感染者が急増した場合の対応の遅れや医療崩壊が懸念される。

4 つ目の自主性の尊重は、個人の自由を尊重して外出などの制限は設けず新型コロナウイルスの感染が確認される前と近い経済活動を継続させる政策である。この政策を採っている国はスウェーデンやブラジルなどがある。集団免疫の早期獲得や経済活動の継続ができる一方で、感染者急増による医療崩壊の懸念がある。

### 3.2 政策ごとの累計感染者数の比較

4 つの政策から代表的な国の累計感染者数の割合をグラフにした。最終日の累計感染者数が 1 となるようにした。そのグラフが図 1, 2, 3, 4 である。

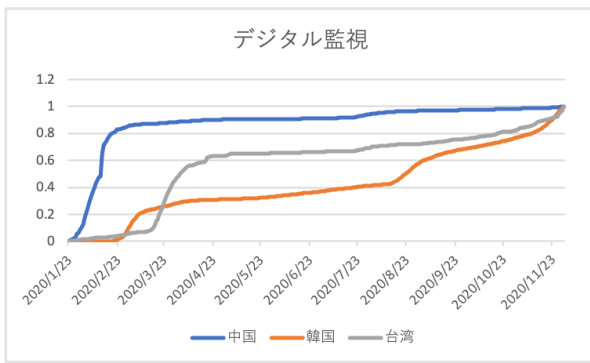


図1 デジタル監視の累計感染者数の割合

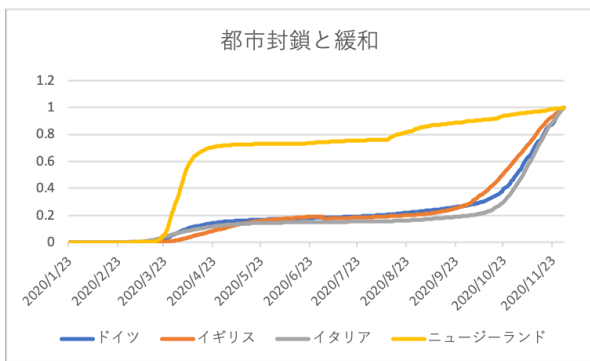


図2 都市封鎖と緩和の累計感染者数の割合

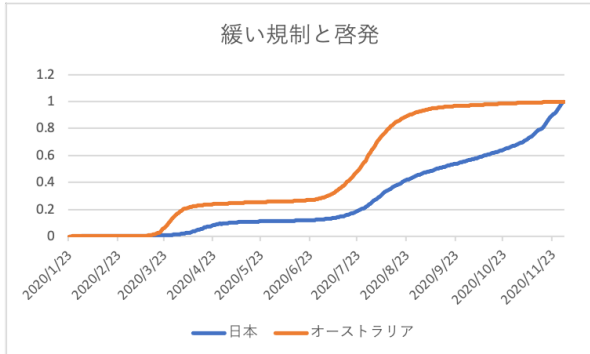


図3 緩い規制と啓発の累計感染者数の割合

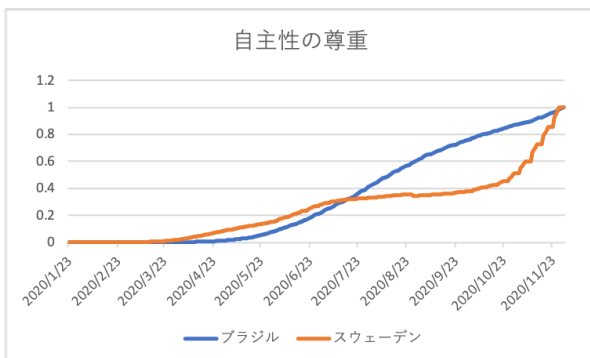


図4 自主性の尊重の累計感染者数の割合

### 3.3 感染者数の傾向と考察

デジタル監視の国は、他の政策と比較して早く収束していると言える。デジタル監視の中でも収束している国と感染者が増加している国もあるが、人と接触をしない ITでの監視を徹底すれば、感染症の流行を抑えることが可能であると言える。

都市封鎖と緩和の国は、都市封鎖の規制によって感染者数が抑えられたがイギリスやイタリア、ドイツのヨーロッパは10月後半から感染者が急増している。一方でニュージーランドは規制によって感染者数は収まった後も感染者数は急増していない。ヨーロッパで感染が再度拡大したのは、感染力が高い変異型の新型ウイルスが流行したことやヨーロッパ内での行き来が容易であることで感染が急増したと考えられる。

緩い規制と啓発の国は、ピークが2度、3度と到来している。日本だと緊急事態宣言を発令したことで一旦は収束に向かったが、緊急事態宣言の解除やGoToキャンペーンで経済活動の活性化を実施などによって第2波、第3波と感染者数が増加したと考えられる。

自主性の尊重の国は、ブラジルは一定して増加しており、スペインも一旦落ち着いたが11月ごろになってまた急増している。気の緩みや再感染例があったことが原因だと考えられる。この政策の長所である集団免疫を獲得することの有効性は今後の状況次第である。

## 4 感染症の数理モデル

今回、1927年に論文で提案された[6]感染症の数理モデルの原点であるSIRモデルとSIRモデルから派生したSISモデルを取り上げる[1],[2].

### 4.1 SIRモデルとSISモデル

SIRモデルは、全人口を感受性者・感染者・免疫保持者の3つに分割して、感受性者Sは感受性保持者Sと感染者Iの積に比例して感染率 $\beta$ で感染者Iに移行し、感染者Iは回復率 $\gamma$ で免疫保持者Rに移行すると仮定されるモデルである。状態遷移図を表したのが図5、その微分方程式が式(1)である。

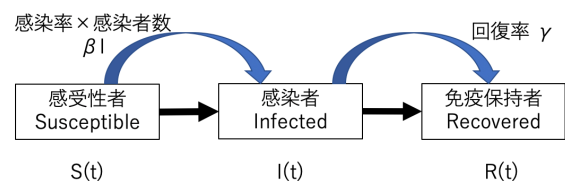


図5 SIRモデルの状態遷移図

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt}(t) &= -\beta \frac{S(t)}{N} I(t) \\ \frac{dI}{dt}(t) &= \beta \frac{S(t)}{N} I(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR}{dt}(t) &= \gamma I(t) \end{aligned} \quad (1)$$

SIS モデルは長期的な免疫を獲得されないことを考慮したモデルで、全人口を感受性者・感染者の2つに分割して、感受性者 S は感受性者 S と感染者 I の積に比例して感染率  $\beta$  で感染者 I に移行し、感染者 I は回復率  $\gamma$  で再び感受性者に戻ると仮定される。状態遷移図を表したのが図 6、その微分方程式が式 (2) である。

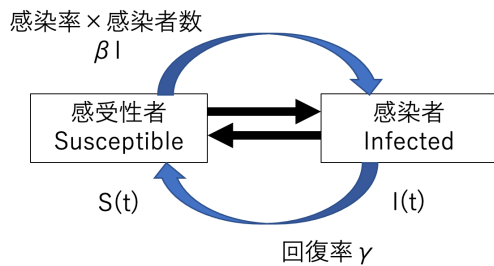


図 6 SIS モデルの状態遷移図

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt}(t) &= -\beta \frac{S(t)I(t)}{N} + \gamma I(t) \\ \frac{dI}{dt}(t) &= \beta \frac{S(t)}{N} I(t) - \gamma I(t) \end{aligned} \quad (2)$$

記号の定理

- t : 時刻, 単位は日 (day)
- S(t) : 時刻 t における感受性者数
- I(t) : 時刻 t における感染者数
- R(t) : 時刻 t における免疫保持者数または死亡者数
- N : 全人口数
- β : 感染率
- γ : 回復率, 逆数は平均感染期間

4.2 実行再生産数

実行再生産数を用いてシミュレーションを行う。実行再生産数は、1 人の感染者が平均して何人に感染させるかを示すものである。計算式は、  
 実行再生産数 =  $\left( \frac{\text{直近 7 日間の新規陽性感染者数}}{\text{その前 7 日間の新規陽性者数}} \right)^{\frac{\text{平均世代時間}}{\text{報告間隔}}}$   
 である。当時北海道大学大学院医学研究院の西浦教授が、平均世代時間を 5 日、報告間隔を 7 日と仮定しており、本研究もその仮定に基づき計算する [3]。ただし、上記の計算方法で計算できない場合は、  
 実行再生産数 =  $\left( \frac{\text{直近の新規陽性感染者数}}{\text{その前日の新規陽性者数}} \right)^{\frac{\text{平均世代時間}}{\text{報告間隔}}}$  と  
 して、それでも計算できない場合は 0 として計算する。

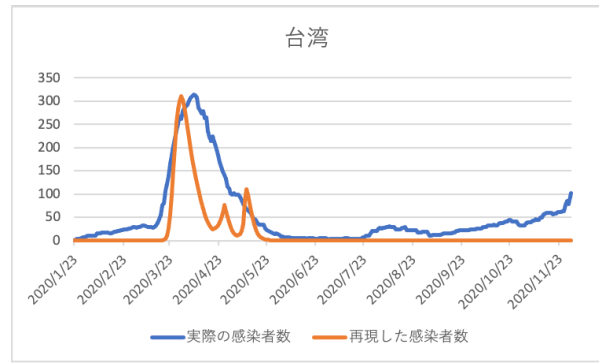


図 7 台湾 : SIR モデルでの再現

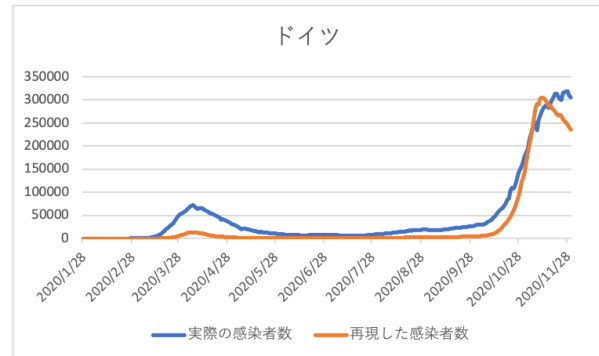


図 8 ドイツ : SIR モデルでの再現

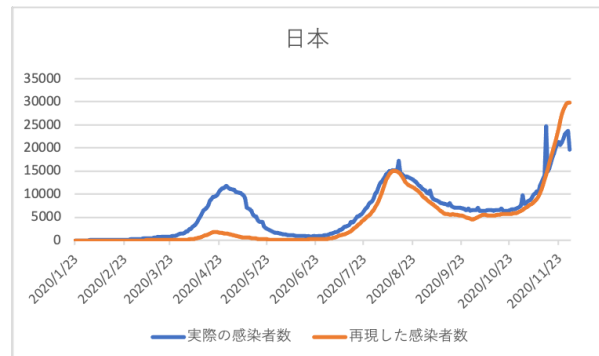


図 9 日本 : SIR モデルでの再現

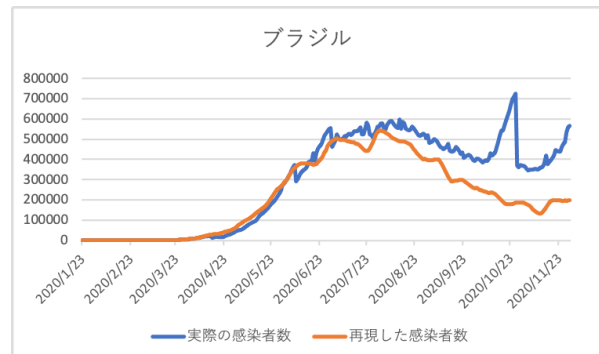


図 10 ブラジル : SIR モデルでの再現

### 4.3 SIR モデルのシミュレーション

実行再生産数 $=\frac{\text{感染率}}{\text{回復率}}$ と表されるので、感染率を実行再生産数 $\times$ 回復率の変数としてシミュレーションしていき、実際の結果に近づくように回復率を定める。各政策から台湾・ドイツ・日本・ブラジルを実際のデータと SIR モデルで再現した感染者数を比較する。このグラフが図 7, 8, 9, 10 である。

再現した際の回復率と感染者数の相対誤差 3 割以内の割合を表したのが表 1 である。相対誤差は  $\frac{\text{再現した感染者数}-\text{実際の感染者数}}{\text{実際の感染者数}} \times 100$  で計算した。

表 1 回復率と相対誤差 3 割以内の割合

国名	回復率 $\gamma$	相対誤差 3 割以内の割合
台湾	1/3.3	5.11%
ドイツ	1/3.0	10.7%
日本	1/4.45	40.0%
ブラジル	1/6.1	52.1%

このように SIR モデルは実行再生産数を用いて感染率を変数にすることでどの政策の国でもピークや増減関係を掴むことができることがわかった。しかし、相対誤差 3 割以内の割合が低い国もあり、正確な感染者数を導くのは難しい。

### 4.4 SIS モデルのシミュレーション

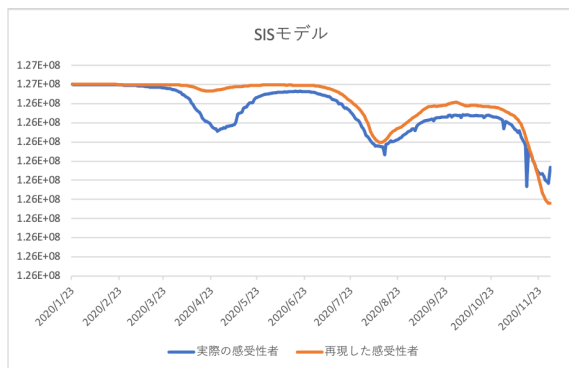


図 11 SIS モデルの実際の感受性者と再現した感受性者

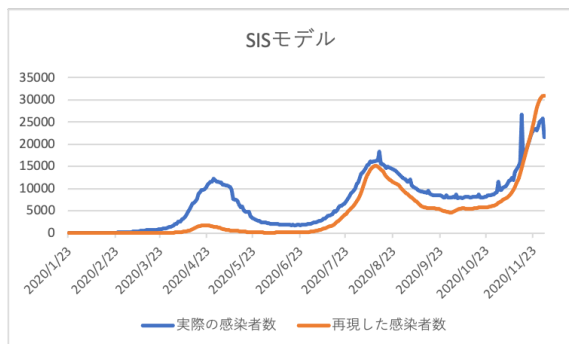


図 12 SIS モデルの実際の感染者と再現した感染者

SIS モデルで日本の感受性者数と感染者数をシミュレーションをした結果を比較する。感受性者数の結果が図 11、感染者数の結果が図 12 である。

このように実行再生産数を用いると SIS モデルもピークや増減関係を掴むことができることがわかった。

## 5 おわりに

各国で様々な政策がとられているが、政策や地域ごとに感染者数の傾向に特徴があることがわかり、その感染者数の動向は実行再生産数を用いることで過去に提唱された数理モデルに従うことがわかった。感染者数を抑えるには実行再生産数を 1 以下にするつまり、感染者数を前日や先週より増やさないようにするだけで可能である。その意識で行動することが必要である。また、今回新型コロナウイルスの感染が流行して、日本では経済活動の制限で失業する人が増えたり、雇用が減ったりした。政府も特別定額給付金の配布や、GoTo キャンペーンなど国民や企業を支援するはたらきを行なっているが、こうした失業や自粛での人と触れ合う機会の減少でメンタルヘルスの問題も増えているのも実情である。こうした均衡の問題も考えていかなければならない。

新型コロナウイルスは現在でも感染者数と死亡者共に増加している。過去を見ても新型コロナウイルスのような感染症は数年、数十年おきに流行しているが、流行を抑える決定的な方法は未だわかっていない。今回、新型コロナウイルスにおいて数理モデルに従うことがわかったので、これからまた流行する感染症に備え、感染症の対策と感染者数の動向について考える必要がある。

## 参考文献

- [1] 稲葉寿：“感染症の数理モデル”。培風館，東京，2008.
- [2] 大日康史・菅原民枝：“パンデミック・シミュレーション 感染症数理モデルの応用”。技術評論社，東京，1981.
- [3] 荻野和樹：“東洋経済オンライン「新型コロナウイルス 国内感染の状況」”。2021-1-12. <https://toyokeizai.net/sp/visual/tko/covid19/>
- [4] Arthur D. Little Japan : “Strategy: How to cope with the uncertainties of tomorrow’s new world”. 2020-9-8. <https://www.adlittle.jp/Uncertaintiesoftomorrow>
- [5] Johns-Hopkins University：“Coronavirus Covid-19”. 2020-9-1. <https://gisanddata.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.htm#bda7594740fd40299423467b48e9ecf6>
- [6] W. O. Kermack and A. G. McKendrick：“A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics”. London, 1927.