

微分方程式モデルによる新型コロナウイルスの感染予測

2017SS087 内田美月

指導教員：小藤俊幸

1 はじめに

2019年12月に中国湖北省で原因不明の肺炎が流行し、2020年1月7日には中国の研究者によって新型コロナウイルスが病原体であると報告された。新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は世界へ広がり、日常生活や経済に影響を及ぼすほどのパンデミックとなった。

京都大学大学院医学研究院教授である西浦博氏は SIR モデルを使った感染状況のシミュレーションを発表した。本研究では、西浦氏が利用したモデルを基に感染症の数理モデルについて考える。

2 研究の目的

下の図は日本国内の感染者数の推移を表している [1]。グラフでは波が見られ、左から第一波・第二波・第三波と呼ばれている。一度収束に向かった感染者数が再び増加した原因の解明と、実際の感染状況に近い数理モデルの構築を研究の目標とする。

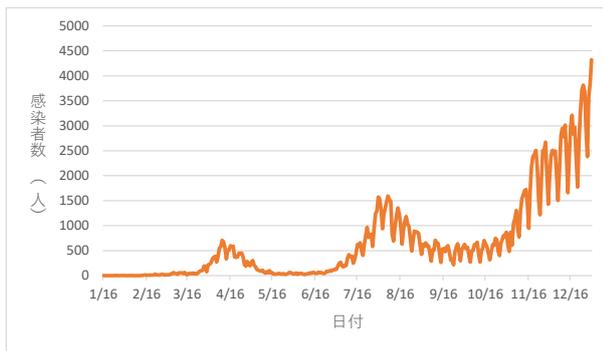


図1 感染者数の推移

3 基本的な SIR モデル

ある地域における伝染病の流行を考える。住民を感受性者、感染者、除去者に分けて考える伝染病の数理モデルを **SIR モデル** と言う。ただし、他の地域との交流や出生や（伝染病以外での）死亡による人口の増減は考えない。



時刻 t における感受性者数を $S(t)$ 、感染者数を $I(t)$ 、除去者数を $R(t)$ 、平均感染期間の逆数を γ 、総人口数を N 、実効再生産数（感染個体がすでに存在するかもしれない集団内で、一感染個体により直接生み出される感染個体数の平均）を R_t とするとき、伝染病の流行は、次の常微分方程式によってモデル化される [2]。このモデルはカーマック・マッケンドリックのモデルと呼ばれている。

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

なお、西浦モデルでは年齢による異質性を考えており、0~14歳を子ども (child)、15~64歳を大人 (adult)、65歳以上を高齢者 (elderly) として、三つに群分けしたモデルが利用されている [3]。

4 感染者数の波

4.1 検証方法

3で説明したモデル内で時刻 t における R_t をそれぞれ定義することで、感染者の推移の再現を試みた。また、時刻 t の R_t の値と当時の COVID-19 に関する政策やニュースを照らし合わせることで、感染拡大の原因を追究する [4][5]。

4.2 実効再生産数の定め方

東洋経済オンラインサイトに記載された実効再生産数の計算式

$$\left(\frac{\text{直近7日間の新規陽性者数}}{\text{その前7日間の新規陽性者数}} \right)^{(\text{平均世代時間})/(\text{報告間隔})} \quad (2)$$

を用いて各日の R_t を求める [6]。ただし、平均世代時間は5日、報告間隔は7日と仮定し、式 (2) では計算不可能であるため、0~9日目は $R_t = 0.3$ 、10~16日目は $R_t = 5.179474679$ とした。（国内で初めて感染者が確認された1月16日を0日目としている）

式 (2) から求められた R_t の値の推移は図2のようになり、これらの R_t を数理モデルに反映させた場合の数値結果を図3で示す。

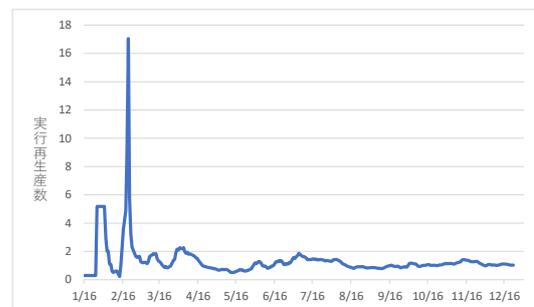


図2 R_t の推移

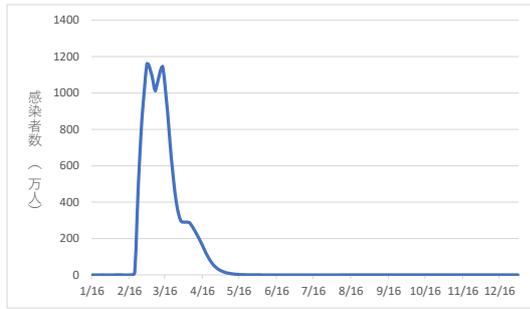


図3 式(2)の R_t を使った実行結果

図3では、2月中旬から4月末にかけて感染者が急増した後に収束している。これは大半の感受性者が感染者・回復者へと変わったからだと考えられる。現実ではこのような感染爆発が起こる前に感染縮小のための政策や個人の自主的な外出自粛がなされるため、実際の感染状況に合うように R_t の値を定め直す必要がある。

4.3 検証結果と考察

R_t の値は次のように設定することで実際の感染者数に近い数値結果を得られた。

0~63日目 (1月16日~3月19日)	: $R_t = 1.10$
64~89日目 (3月20日~4月14日)	: $R_t = 1.95$
90~119日目 (4月15日~5月14日)	: $R_t = 0.70$
120~159日目 (5月15日~6月23日)	: $R_t = 1.00$
160~199日目 (6月24日~8月2日)	: $R_t = 1.30$
200~249日目 (8月3日~9月21日)	: $R_t = 0.85$
250~289日目 (9月22日~10月31日)	: $R_t = 1.13$
290~309日目 (11月1日~11月20日)	: $R_t = 1.20$
310~350日目 (11月21日~12月31日)	: $R_t = 1.06$

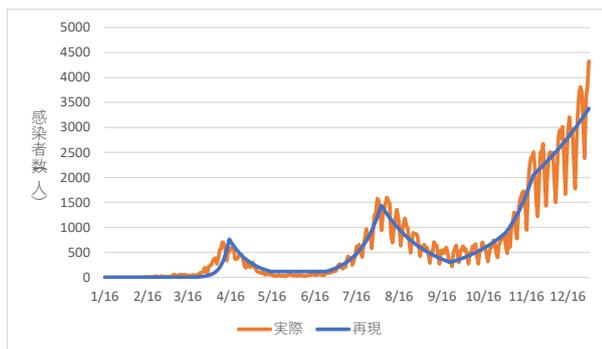


図4 再現結果と実際の感染者数

ここで、 $R_t > 1.0$ となっている期間と国内の出来事を比較する。

1月16日~4月14日

流行初期で COVID-19 に関して分かっていることが少なく、慎重な行動が心掛けられた。一方、軽症者や無症状者の存在の認識も薄かったため、感染拡大となった。第一波は緊急事態宣言によって収束した。

6月24日~8月2日

移動やイベント開催に関する規制の緩和や Go To トラベルキャンペーンが開始された。感染無自覚者が国内を移動してしまったため、感染者が少なかった地域にも感染が広がった。都内の接待を伴う飲食店でのクラスターの多発から、各店の感染対策の強化されたことが第二波が収束した理由の一つと考えられる。

9月22日~12月31日

GO To イートキャンペーンが開始され、多くの国民が利用した [7]。飲食業界の救済となった一方、大人数の会食でのクラスターが多発した。また、海外ではワクチンの開発・接種が始まり、国内でも接種開始の準備に向けた動きが報道された。このワクチンに関する情報などが国民の COVID-19 への認識に影響を与えた可能性がある。また、無症状者でも受けられる低価格の PCR 検査が普及し、無症状者の感染発覚によって感染者数が増加したと言える。

5 おわりに

SIR モデルではひとりの感染者が何人の感受性者を感染させるかを表す実効再生産数 (R_t) がシミュレーション結果に直接影響することが分かった。各時期の実効再生産数から、外出を促す制度や国民の新型コロナウイルス感染症への危機感の薄れ、PCR 検査の普及が感染者数増加の原因の一部であると考えられる。国内で感染者が確認されてから1年が経過した今、感染者を予測できるモデルへの期待は高まっているだろう。SIR モデルを実用化させるため、国内の状況に応じて実効再生産数を予測するモデルの実現が今後の課題である。

参考文献

- [1] 厚生労働省, 新型コロナウイルス感染症について, <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000164708..html> (参照 2021/1/2)
- [2] 小藤俊幸, 考える力をつけるための微積分教科書 (第2版), 学術図書出版社, 2020, pp.95~100
- [3] 西浦博, 「8割おじさん」の数理モデル, Newsweek ニューズウィーク日本版 (2020年6月9日号), pp. 18-23.
- [4] NHK, 特設サイト 新型コロナウイルス, <https://www3.nhk.or.jp/news/special/coronavirus/> (参照 2021/1/2)
- [5] 日本経済新聞, 新型コロナのニュース一覧 (最新版), <https://www.nikkei.com/theme/?bn=41&dw=20012202> (参照 2021/1/1)
- [6] 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, <https://toyokeizai.net/sp/visual/tko/covid19/> (参照 2020/12/25)
- [7] 農林水産省, Go To Eat キャンペーン, <https://gotoeat.maff.go.jp/> (参照 2021/1/1)