

2021年度 修士論文概要

| | | | | | |
|------|--------|------|----------|-----|-------|
| 主査 | 舟橋 健司 | 副査 | 徳田 恵一 | 研究室 | 舟橋研究室 |
| 入学年度 | 2020年度 | 学籍番号 | 32414086 | 氏名 | 福田 太一 |

論文題目 COVID-19 流行予測のための免疫獲得者数を考慮した SEIR モデルの拡張
Extension of SEIR model considering the number of immunized people for COVID-19 epidemic prediction

1 はじめに

2022年現在、世界各国において新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の流行が続いている。日本では緊急事態宣言・蔓延防止重点措置などの政策や複数回にわたるワクチン接種によって COVID-19 の影響力を最小限に留めてきた。このような対策は日別の感染者が増加傾向になる前に意思決定し、実行に移すことによって高い効果を発揮する。しかし、現状として前者の政策によるアプローチは感染者の増加傾向をデータで確認した後に敷かれることが多い。そのため、この問題を解決するためには感染規模の拡大を事前に予測し、政策実行の迅速な意思決定を可能にしていく必要がある。

そこで、本研究では従来感染症の流行予測に有効とされる SEIR モデル [1] と呼ばれる数理モデルの 1 つを用いた日本における COVID-19 の感染拡大の規模を予測する。通常の SEIR モデルと後述する複数の拡張 SEIR モデルを用意し、それぞれの精度比較をもって予測精度向上に必要な要素について考察する。また、SEIR モデルを用いて感染者数の傾向を予測する方法を検討する。

2 SEIR モデルの概要と拡張 SEIR モデルの提案

感染症流行下において人口はウイルスに感染する可能性のある人口である Susceptible, ウィルスに感染したが症状を発していない人口である Exposed, ウィルスに感染し症状を発した人口である Infected, 症状から回復または死亡した人口である Recovered の 4 つに分類される。通常の SEIR モデルはこれらの人口の変化を常微分方程式で表現し、積分計算することで Susceptible から順にボトムアップで予測する (図 1)。このモデルのパラメータは主に基本再生産数, 平均潜伏期間, 平均発症時間の 3 つが存在する。拡張 SEIR モデルは通常の SEIR モデルに予測する人口やパラメータを追加し, 様々な因子を考慮した予測を可能としている。本研究では, 重症者や自然免疫・ワクチンによる免疫獲得者を考慮した次の 4 つの拡張 SEIR モデルを用意した。

- SEIR モデル (重症者込み)

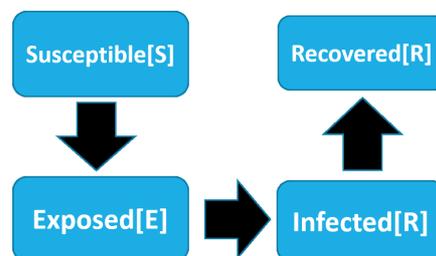


図 1: SEIR モデル

- SEIR モデル (自然免疫込み)
- SEIR モデル (自然免疫+ワクチン)
- SEIR モデル (重症者+自然免疫+ワクチン)

3 SEIR モデルのパラメータ推定

本研究では SEIR モデルのパラメータを推定する上で次の手順を踏んだ。

- Step1. 過去の最適パラメータ導出
- Step2. 未来の最適パラメータ推定

Step1 では SEIR モデルで過去の Recovered の予測シミュレーションを行い, その予測値と既知である過去の観測値との RMSE (平均二乗平方根誤差) が最小になるパラメータ「過去の最適パラメータ」を乱数, または最適化アルゴリズムの一種である Adam によって導出する。Step2 では Step1 得られた過去の最適パラメータの時系列変化に着目し, 未来の流行を予測した際の予測値と未知である未来観測値との RMSE が最小になるであろうパラメータ「未来の最適パラメータ」を時系列分析の手法であるホルトウィンタース法, またはカルマンフィルタを用いて推定する。このようにして得られた未来の最適パラメータを SEIR モデルに投入し, 未来の COVID-19 の流行予測を行う。

4 SEIR モデルの精度検証実験

精度の検証実験について, COVID-19 の流行予測を次の 2 つの時期に分けて行う。

- ワクチン接種が進んでいない時期
(2020年12月～2021年4月)
- ワクチン接種を考慮する時期
(2021年8月～2021年12月)

ワクチン接種が進んでいない時期に関しては通常のSEIRモデル、SEIRモデル(重症者込み)、SEIRモデル(自然免疫)の3つのモデルを、ワクチン接種を考慮する時期に関してはこれらに加えSEIRモデル(自然免疫+ワクチン)、SEIRモデル(重症者+自然免疫+ワクチン)の合計5つのモデルを使用し、それぞれの1ヶ月間のRecoveredの予測値と実測値のMAPEを比較する。

$$MAPE = \frac{1}{n-i+1} \sum_{t=i}^n \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{|y_t|}$$

y_t : 観測値, \hat{y}_t : モデルの予測値

2つの時期に予測を行った際のモデルの予測値のMAPEを表1, 表2に示す。表1より、ワクチン接種が進んでいない時期の予測で平均的な精度が最小であったモデルはSEIRモデル(自然免疫)であったため、この時期の予測においては自然免疫の影響の考慮することがSEIRモデルの精度向上に有効である。また、表2より、ワクチン接種を考慮する時期においても同様に、自然免疫とワクチンの影響の考慮がSEIRモデルの精度向上に有効であった。

表1: ワクチン接種が進んでいない時期における各SEIRモデルのMAPE(一部抜粋)

| 予測期間 | 通常 | 重症者 | 自然免疫 |
|----------|----------|----------|----------|
| 2020年12月 | 0.078721 | 0.074060 | 0.080209 |
| 2021年1月 | 0.020867 | 0.020196 | 0.020812 |
| 2021年2月 | 0.063254 | 0.074968 | 0.063581 |
| 2021年3月 | 0.009542 | 0.009168 | 0.002200 |
| 2021年4月 | 0.012603 | 0.012615 | 0.011871 |
| 平均 | 0.036619 | 0.037822 | 0.035387 |

表2: ワクチン接種を考慮する時期における各SEIRモデルのMAPE(一部抜粋)

| 予測期間 | 通常 | 自然免疫 +ワクチン | 重症者 +自然免疫 +ワクチン |
|----------|----------|---------------|-----------------------|
| 2021年8月 | 0.022574 | 0.019963 | 0.021297 |
| 2021年9月 | 0.092761 | 0.082462 | 0.119006 |
| 2021年10月 | 0.001692 | 0.003155 | 0.027888 |
| 2021年11月 | 0.000955 | 0.006099 | 0.003966 |
| 2021年12月 | 0.000187 | 0.000893 | 0.000786 |
| 平均 | 0.023634 | 0.022514 | 0.034589 |

表3: Infectedの実測値との相関係数(一部抜粋)

| 予測期間 | Recoveredの 予測値の差分 |
|----------|----------------------|
| 2020年12月 | 0.973004 |
| 2021年8月 | 0.952419 |
| 2021年10月 | 0.942157 |
| 2021年11月 | 0.990732 |

5 拡張SEIRモデルを用いた感染者数の傾向予測

拡張SEIRモデルを利用した感染者数の傾向予測について述べる。Recoveredの実測値の要素間の差分($y_{t+1} - y_t$)とInfectedの実測値は強い正の相関関係($r = 0.956457$)にある。そこで、Recoveredを高い精度で予測できている場合にその拡張SEIRモデルの予測値の差分によってInfectedの傾向を把握できるという仮説を立て、Infectedの実測値との相関関係を調査する。Recoveredの予測値は4章の実験で平均的なMAPEが最小であった拡張SEIRモデルによるものを利用した。

その結果を表3に示す。2020年12月、2021年8月、10月、11月において、拡張SEIRモデルのRecoveredの予測値の差分はInfectedの実測値と強い正の相関関係にあった($r > 0.90$)。これらの時期は1ヶ月前にInfectedの傾向が変わり始めているという共通点を持つため、そのような時期に拡張SEIRモデルを用いることでInfectedの傾向を正しく予測できることが示唆される。

6 むすび

本研究では、感染症の流行予測に有効とされるSEIRモデルを拡張してCOVID-19の流行予測を行った。その結果、自然免疫とワクチンの影響を考慮することが精度向上に有効であった。また、拡張SEIRモデルの予測結果を用いて感染者数の傾向を予測した。その結果、予測を行う時期の1ヶ月前に感染者数の傾向が変わり始めていた場合に感染者数の傾向を正しく予測できた。今後の課題としては、SEIRモデルの新たな拡張による精度向上、Infectedの傾向を全ての時期において予測できるパラメータの推定などを検討している。

参考文献

- [1] 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, 第54巻, 第2号, 2006.