

人流移動効果を考慮した感染症数理モデルの開発

日大生産工(学部) ○織田 彩友美 日大生産工 佐々木 真

1. 背景

人類は紀元前から、さまざまな感染症と戦っている。天然痘、ペスト、新型インフルエンザなどが挙げられる。2019年12月初旬に中国の武漢市で感染者が報告されたCOVID-19は、未だ収束に至っていない。経済活動を回復させるためにも感染の流行を詳細に予測する手法を開発することが急務である。感染症流行予測を記述する数理モデルにSIRモデルがある。SIRモデルは未感染者 (Susceptible)、感染者 (Infected)、感染後死亡もしくは回復による免疫を獲得した者 (Recovered) の頭文字であり、SIRそれぞれ3本の連立微分方程式で表される。このモデルによって単一の都市や国における予測が可能である。さらに都市間の感染者数の伝播を考える場合は、モデルの拡張が必要となる。

本研究では、都市間の感染者数伝播を考慮可能なモデルを提案する。感染症の伝播は人流の移動が担っている。Fig.1に示すように各地方・地域間では、人流交換がネットワークをなしている。ここでは、国内の人流移動の統計データを基に各都市間の人流交換量を評価し、SIR-modelにその効果を取り込んだ。



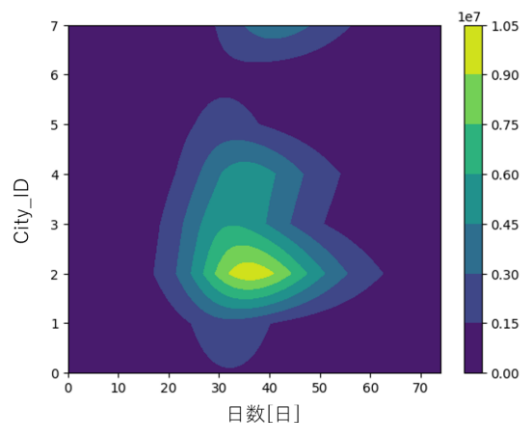
Fig.1 人流移動による都市間の結合

2. 都市毎の感染者数の時空間挙動

都市毎のCOVID-19の感染者数推移をFig.2に示す。本データはどのようにしてこのデータを得たのかを書く。第7波 (R4.7.1~R4.9.30) に対応する領域を抜き出したものである。縦軸には都

市のラベル番号で表示おり、北から順に北海道から九州・沖縄地方までが示されている。この波は $t=20$ あたりで関東から感染者数の増加が始まり、 $t=35$ 近傍でピークを迎え、 $t=60$ すなわち40日程度で収束していることが分かる。一方で都市毎の挙動に注目すると、関東を起点に他の地方に感染の波が伝播していることが分かる。例えば、中国地方では感染が始まるまで関東に比べ約10日の遅れがある。また、九州・沖縄地方の感染者増加は、中国地方に比べ早いことから、実空間における単純な拡散では扱えないことが分かる。

そこで本研究では、人流交換による都市間の経路関係に着目する。上述な感染が始まるまでの遅れ時間を予測することが出来れば行政の対策が可能となる。そのため都市間伝播を記述する拡張型のモデルを開発する必要がある。



City_ID
0.北海道 1.東北 2.関東 3.中部
4.近畿 5.中国 6.四国 7.九州・沖縄
Fig.2 各都市の感染者数推移

3. 都市毎の人流移動を考慮したSIRモデル

都市間の人流交換を考慮する以下のモデル²⁾を提案する。

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \left(S_i(t) - \sum_j \sigma_{ij} S_j(t) + \sum_j \sigma_{ji} S_i(t) \right) I_i \quad (1)$$

Mathematical modelling for spread of infectious diseases in the presence of human mobility.

Ayumi ODA and Makoto SASAKI

$$\frac{dI}{dt} = \beta \left(S_i(t) - \sum_j \sigma_{ij} S_j(t) + \sum_j \sigma_{ji} S_i(t) \right) I_i(t) - \gamma I_i(t) \quad (2)$$

ここで S_i 、 I_i はそれぞれ都市毎における未感染者数、感染者数を表す。 σ_{ij} は都市*i*から都市*j*の移動確率を表す。移動確率は都市*i*から移動する総人口に対する都市*j*に移動した割合である。国土交通省の純流動表データを引用し、移動行列 σ を評価した。 σ により都市間人流移動を考慮したSIRモデルの構築が可能となる。 $\sigma=0$ とすると従来のモデルに一致する。 β は感染率、 γ は死亡率・回復率を表す。また、 S_i は都市の人口、 I_i は感染者数、 R_i は死者数または回復者数を表す。式(1)は都市の人口 $S_i(t+1)$ を*t*における都市*i*の人口と都市*i*から都市*j*に移動する人口、都市*j*から都市*i*に移動する人の和を従来のSIRモデルに適用することにより求めている。式(2)も同様に $I_i(t+1)$ を求めることができる。厚生労働省の感染者・死者または回復者数データに対して、本手法を適用することで人流移動を含む感染者数の推定を行った。

4. 感染率と死亡率・回復率の推定

より詳細な予測には、 β と γ を適切にすることが必要である。感染者の実測値を再現するように、 β と γ を以下のように選択した。感染者と増加の傾向より基本再生産数*c*を評価し、その値を固定した状態で β と γ をスキャンし、適切なパラメータを求めた。 β を変化させたときのモデルによる推測値と実測値の2乗誤差の振る舞いをFig.3に示す。2乗誤差が最小のとき、 $\beta \approx 1.14 \times 10^{-8}$ となる。回復率 γ は、その都市の実効再生産数に合うように決定した。

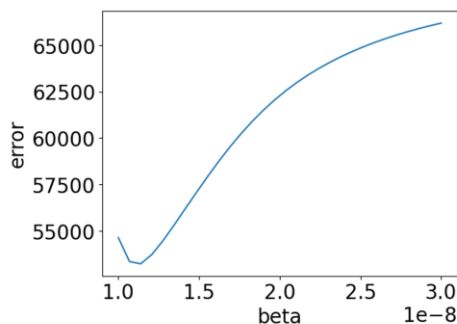


Fig.3 推測値と実測値の2乗誤差の振る舞い

5. 拡張型SIRモデルによる推定

Fig.4は関東と四国の実測値に加え、求めた β と γ を使用したシミュレーションの結果を載せた図である。横軸は日数、縦軸は感染者数に対応する。Fig.4(a)より、関東は $t=30$ でピークを迎え、四国は $t=55$ でピークを迎えている。感染の波が伝播するまでに約25日かかる。一方Fig.4(b)の推測値では、関東は $t=40$ でピークを迎え、四国は $t=50$ でピークを迎える。すなわち、四国の感染の波は関東より約10日遅くなっている。この結果より、関東を起点に感染の波が伝播することを確認した。

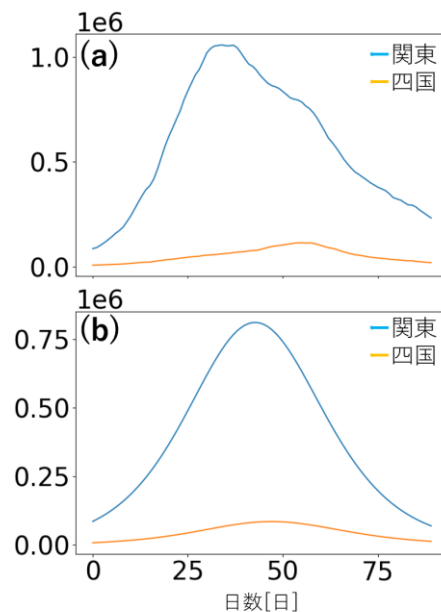


Fig.4 (a)実測値と(b)推測値の感染者数

6. まとめ

人流移動を考慮した拡張型SIRモデルの提案をした。人流交換行列は国土交通省より評価した。定量的な予測をするために必要なパラメータを推測した。推測した β と γ を拡張型SIRモデルに適用した。講演では、各地方への時間遅れ特性や感染の起点となる都市の推定手法について詳述する。

参考文献

- 1) 稲葉寿 「感染症の数理モデル」株式会社 培風館 2020年
- 2) 杉山泰生 卒業論文 2023年