

年齢構造を反映した感染症数理モデルによるシミュレーション

理学専攻・情報科学コース 1740661 弘光 夏子

1 はじめに

日本で知られる感染症は様々だが、一般的に誰もが感染経験があるポピュラーな感染症といえばインフルエンザだろう。インフルエンザは毎冬流行するため、流行状況をテレビや新聞で取り上げられているのを目にすることも多い。インフルエンザの感染は日本に限った話ではなく世界中で感染が確認されており、2009年には新型インフルエンザが世界中で大流行し、214の国と地域で感染が確認されている [1]。感染症対策として有効なのは手洗いうがい、マスクの着用、規則正しい生活をして免疫力を下げないこと、また感染が広まりやすい学校での学級閉鎖などが挙げられる。これらの対策は世界中どこでも全く同等の感染対策としての効果があるのだろうか。国ごとに年齢別の人口構造が違っていたり、行動範囲が違っていたりするため、世界中で同様な対策を行ったところで同様に有効だとは限らない。そこで本研究では年齢別 SIR モデルを用いて、日本ではどのようなインフルエンザ対策が有効なのかを検証する。年齢別 SIR モデルとは、通常の SIR モデルに年齢構造の要素を付け足したものである [2]。SIR モデルとは「Susceptible (感染前)」「Infected (感染状態)」「Recoverd (免疫獲得)」の3つの状態がある感染症のモデルである。感染率や治癒率などのパラメータの値を与えて、一人の感染者からどの程度感染が拡大するか、あるいはしないかをシミュレーションする。

2 年齢別 SIR モデル

先行研究では、人と人とがどの程度接触しているかの調査と人口統計データを用いて、152カ国の社会構造を反映した接触行列を推定している [2]。これは、年齢を0~4歳、5~9歳、10~14歳のように5歳刻みの16グループにわけ、それぞれのグループが「家」「職場」「学校」「その他」の4つの領域でそれぞれの年齢グループ間でどの程度接触するかの確率のことである。この接触行列を用いた SIR モデルが先行研究で紹介されている。本研究ではこのモデルを利用した。年齢別 SIR モデルの数式を以下に示す。

$$\frac{dS_a}{dt} = -\beta S_a \sum_{\alpha=1}^{16} \mu_{a,\alpha} \frac{I_\alpha}{N_\alpha} \quad (1)$$

$$\frac{dI_a}{dt} = \beta S_a \sum_{\alpha=1}^{16} \mu_{a,\alpha} \frac{I_\alpha}{N_\alpha} - \gamma I_a \quad (2)$$

$$\frac{dR_a}{dt} = \gamma I_a \quad (3)$$

なお、それぞれのパラメータが示すのは a, α が年齢グループ、 β が感染率、 μ が接触率、 γ が治癒率、 N が母集団の人数である。接触率 μ は先行研究で算出された日本のデータを使用する。また、母集団の人数 N は日本の人口を使用する。シミュレーションを行う際のパラメータは、基本再生産数 R_0 を基準とした。基

本再生産数とは、1人の感染者が全感染期間において再生産する2次感染者の期待値である。 $R_0 < 1$ であれば感染は流行せず、 $R_0 > 1$ であれば感染が流行する。インフルエンザはこれが2~3であるため、それに合わせてパラメータの値を決めた。このモデルにおける R_0 は以下の行列の最大固有値である。

$$-T\Sigma^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{\mu_{1,1}\beta N_1}{N_1} & \frac{\mu_{1,2}\beta N_1}{N_2} & \cdots & \frac{\mu_{1,16}\beta N_1}{N_{16}} \\ \frac{\mu_{2,1}\beta N_2}{N_1} & \frac{\mu_{2,2}\beta N_2}{N_2} & \cdots & \frac{\mu_{2,16}\beta N_2}{N_{16}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\mu_{16,1}\beta N_{16}}{N_1} & \frac{\mu_{16,2}\beta N_{16}}{N_2} & \cdots & \frac{\mu_{16,16}\beta N_{16}}{N_{16}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \frac{1}{\gamma} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\gamma} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{\gamma} \end{pmatrix} \quad (4)$$

行列 T は伝送、行列 Σ は遷移に対応する。

3 シナリオ

感染症のシミュレーションにあたって、インフルエンザを想定してインフルエンザ対策の3つのシナリオを用意した。それらについて説明する。

(シナリオ1) 小学校が学校閉鎖

学級閉鎖、学校閉鎖は学内での大規模流行を防ぐためによく取られる措置である。このシナリオは先行研究でも検証されている。年齢グループが5歳ごとであるため、学級閉鎖を表現することは難しい。そこで学校閉鎖を想定し、小学生が所属する年齢グループであるグループ1~3での接触率 μ を0とした。

(シナリオ2) 家以外でマスクをつける

通勤・通学など幅広い年齢層の人が公共交通機関を利用している。遊びに出かけるなどの外出を控えることはできても、通勤や通学を控えるというのは現実的ではない。そこで感染対策としてマスクを着用したとして、5歳以上の全てのグループ(グループ1以外全て)の「その他」「職場」「学校」の接触率 μ を2割削減した。

(シナリオ3) 職場での接触をなるべく避ける

このシナリオも先行研究で検証されている。学校では学級閉鎖などの措置が取られるが、会社にはそのようなものはない。つまり、社内で出来るだけ他の人との接触を避けることで、感染対策につなげるしか方法はない。そこで、働いていると考えられる20~64歳までのグループ5~13の接触率 μ を下げた。このシナリオでは接触率 μ が5割削減と8割削減の2パターンを検証した。

これらの3つのシナリオを日本と、日本とは人口構造(人口ピラミッド)の違う国であるボリビアと南アフリカについてシミュレーションを行い比較する。

4 結果と考察

それぞれのシナリオを実行したものを図1, 図2として示す。感染者の総数はRであるため、縦軸はRの割合とする。ただし、図1の横軸は以下の通りである。図2の横軸は年齢グループである。

表 1: 図1のグラフの横軸

| | |
|---|--------------|
| A | 対策無し |
| B | シナリオ 1 |
| C | シナリオ 2 |
| D | シナリオ 3(5 割減) |
| E | シナリオ 3(8 割減) |
| 1 | $R_0=3.3$ |
| 2 | $R_0=2.1$ |

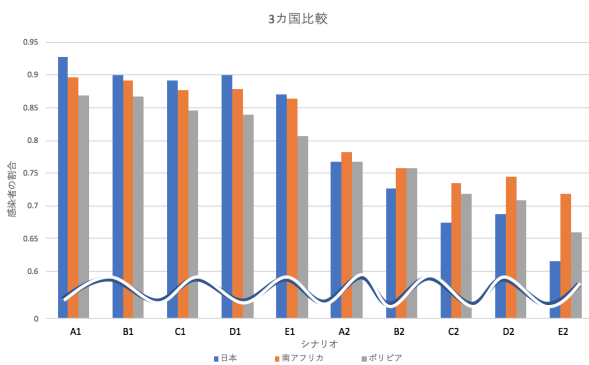


図 1: 3カ国比較

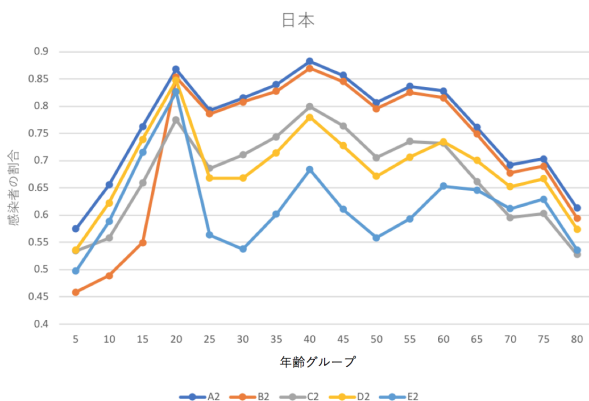


図 2: 日本での各グループの総感染者の割合

まずは図1に着目する。 $R_0 = 3.3$ の場合は3つの全ての国でそれぞれのシナリオに大きな変化は見られなかった。すなわち、基本再生産数 R_0 が大きいと感染の拡大の方が強くなってしまい、対策の効果があまりみられないということがわかった。

$R_0 = 2.1$ の場合は、3つの全ての国で最も効果がみられたのはE2であった。二番目に効果がみられたのは、日本と南アフリカではC2、ボリビアではD2であった。日本と南アフリカは効果があつた対策の順序は一緒であるものの、どの程度効果がでているかという点では異なつた結果となつた。つまり、接触率と人

口構成が異なる場合は同じ対策をしても同じように効果が得られるわけではないということが分かった。

次に図2に着目する。まずはA2とB2を見比べてみると、バイアスをかけた0~14歳までの年齢グループのみに対策の効果がみられ、他の年齢グループはA2と大差のない感染者割合となっている。C2については0~4歳までの年齢グループ以外すべてにバイアスをかけているので、全体的に感染者数が減少している。しかし、D2とE2をよくみると、バイアスをかけているのは20~64歳までの年齢グループであるにも関わらず、それ以外の年齢グループの感染者数も下がっている。つまり、職場での接触率を下げることは、働いていない年齢の人たちの感染率にも影響を与えるということである。インフルエンザの感染が社内で拡大しているような場合は在宅勤務などを行うことができるのならば、そうすることでインフルエンザの拡大を防ぐことができるだろう。

5 まとめ

本研究では日本でのインフルエンザを想定したシミュレーションを行った。シミュレーションの結果、基本再生産数が大きい場合はインフルエンザの対策の効果が得られにくいということがわかった。また、学校で学級閉鎖、学校閉鎖があるように職場でもそのようなことが可能ならば、そうすることで他の年齢グループの感染率も下がるということが分かった。日本とは人口ピラミッドの形が違う南アフリカとボリビアで同じ感染症対策シナリオを用いてシミュレーションを行った場合は、日本とは異なる結果が得られた。そのことから、やはり国によって効果のある対策は違うということがいえる。

今回は高齢者を対象にした対策シナリオを用意していなかった。そのため、高齢者のみをターゲットにしたような感染対策を考えた場合はどうなるのか検証することが、今後の課題である。

参考文献

- [1] 進藤奈邦子「2009年インフルエンザパンデミック(H1N1)その広がり健康被害」, <http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kekaku-kansenshou04/dl/infu100528-02.pdf> (2018/1/17アクセス)
- [2] Kiesha Prem, Alex R.Cook, Mark Jit, Projecting social contact matrices in 152 countries using contact surveys and demographic data, PLOS Computational Biology, **13**, e1005697, (2017)