

感染症パンデミックの時空間ダイナミクス解析

佐々木真*、川崎凌*、荒川弘之**、安本晋也***、杉田暁***

*日本大学生産工学部、**島根大学学術研究院理工学系、***中部大学国際 GIS センター

1. はじめに

新型コロナウイルス (COVID-19) の感染拡大が全世界的な喫緊の大問題となっている。COVID-19 は中国の武漢で確認され、世界中に拡大しパンデミックとなった。この感染拡大は、感染症の特性や人類の行動特性・地理的条件の複合的結果である。COVID-19 を制御・予測するためには、感染症の時空間ダイナミクスを明らかにすることが重要である。特に、各自治体や国への指針を与えるためには、年齢空間や実空間における伝播特性を理解する事が重要である。年齢空間における伝播・拡散挙動からワクチン接種等の戦略を考える事ができ、実空間伝播特性からは、感染拡大を制御する指針を得る事が可能となる。

本研究では、COVID-19 の感染者に関するビックデータ解析を通して、年齢空間及び実空間における感染者数の伝播・拡散特性を整理し、COVID-19 挙動予測や制御指針の基盤を構築することを目指す。本報告は、川崎凌くんの卒業研究としての共同研究によるものであり、以降の報告の一部は[1]からの引用である。更に、数理モデルを基に、都市間の人流移動と都市毎の感染推移の関係も合わせて考察する。

2. 方法

COVID-19 の感染者数データはジャックジャパン株式会社[2]と厚生労働省[3] が公開しているオープンデータを使用した。ジャックジャパンの公開データは性別や発症日など多様な情報が含まれる。本研究では、受診都道府県(x)・年代(y)・感染確定日(t)の情報を抽出し解析を行った。年代は(0-10, 10, ..., 70, 80以上)の9つ、受診都道府県は47都道府県、感染確定日は1/15/2020~11/11/2020のデータに振り分けた。このような大規模なデータ群を感染確定日・年代・受診都市の3変数からなる巨大配列に整理した。図.1はこの巨大三次元配列のイメージ図である。以降の解析は作成した3次元配列をもとに行った。



図.1 感染者情報のイメージ図：感染確定日・年代・受診都市からなる3次元配列 [1]

図.2は都市間・年代間の感染者数を時間積分した波形、及びその高周波成分・低周波成分である。高周波成分は一週間周期を基本波とした非線形波形となっており、人間の行動周期や検査数周期を反映している。一方、低周波は数週間から月スケールの変動を持ち、これらが感染の波、すなわち第1~5波に対応する。

3. 空間・年代間の感染ダイナミクス解析

年代・都市空間における感染者数の分布例を図.3に示す。左図は2020年5月18日、右図は2020年8月7日の様子である。縦軸・横軸は、それぞれ年代・都市ラベル (ID=1~47) を示しており、色が感染者数を表している。以降では、解析の単純化のため、年齢空間を調べる際は空間積分を、実空間拡散を見る際は、年齢空間積分を行い、低次元化した2次元配列データの解析を行なった。

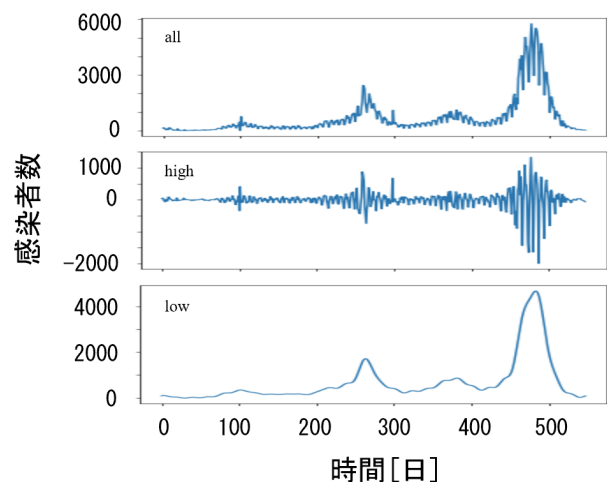


図.2 感染者数の時間発展 (上段)・高周波成分 (中段)・低周波成分 (下段) [1]

3.1 年代間の感染伝播・拡散

年代空間における感染伝播特性を相関解析から明らかにした図.4の左図に年代・時間座標における感染者数推移を示している。縦軸は各年代を、横軸が時間を表している。この図から、20代を起点として各年代に感染が広がっている事がわかる。そこで、年代毎の時間発展について20代の発展との相関解析を行い、相関時間を評価した。結果を図.4に示す。各年代の相関時間は、20代を起点として、時間遅れが直線的に振る舞っており、年代空間への伝播が起きている事がわかる。その伝播速度は、若年層へは約 $2[10age/day]$ に対し、中高年側への伝播速度は約 $5\sim6[10age/day]$ と評価できた。若年層側への伝播速度は中高年側に比べ約36%程度伝播は遅い結果が得られた。これは各年齢層との相互作用特性が異なることを反映していると考えられる。

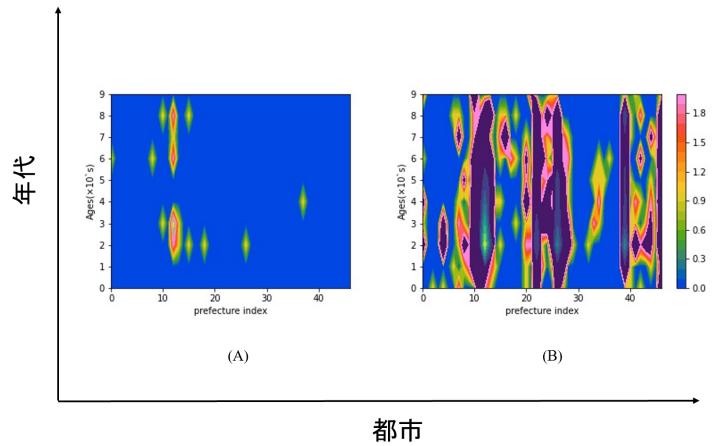


図.3 年代・都市における時間発展
(A) 5/18/2020 (B) 8/7/2020 [1]

3.2 都市地方間伝播・拡散

次に各都市間の感染者数の時間発展を図.5に示す。感染者数が拡大した第2波から第5波を見ると、各波で感染の起点と伝播が確認できる。特に、東北地方や中国・四国地方等、人口密度の低い地方へは感染の波が遅れてやってくる事が分かる。

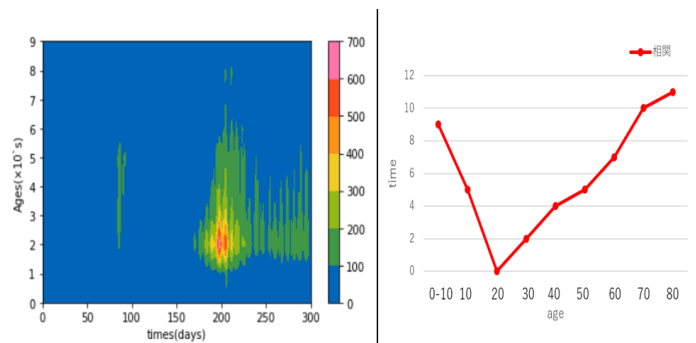


図.4 時間・年代間の依存性(左)
20代と各年代間における相関時間(右) [1]

各波のピーク遅れを相関解析によって評価した。図.6に結果を示す。第2波・第3波・第5波は遅れ日数が7日間以下と少ないため都市間時間遅れが小さいが、第4波は遅れ日数が多く感染者数が多い関西地方が起点となる感染であることが推測される。また、各波毎に、発生起点が異なる事がわかる。感染増加の起点となる都市の予測は困難である事がわかる。一方で、起点となる都市からの伝播速度等は人流解析等から明らかすべき問題であり、その理解をもとに感染爆発の制御が可能となると期待される。

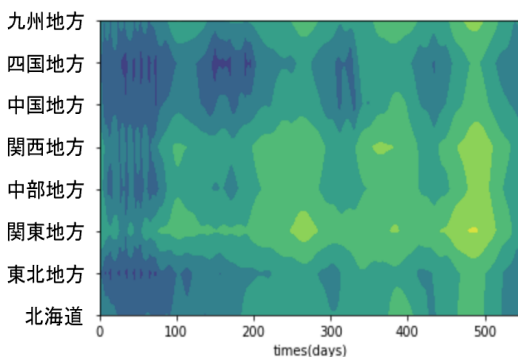


図.5 各地方毎の感染者数の時間発展 [1]

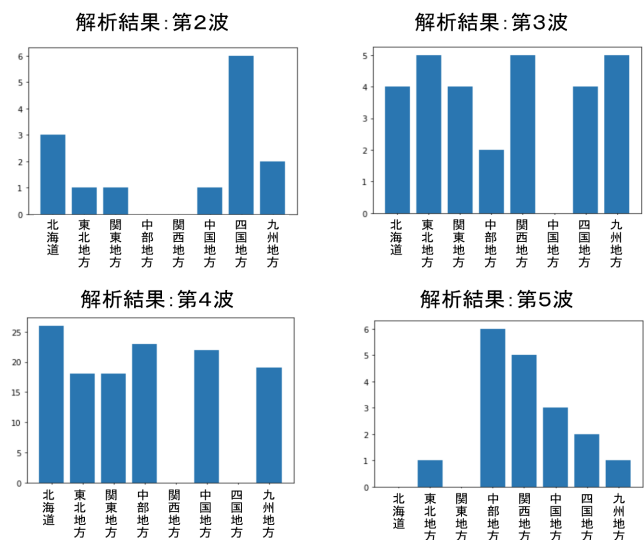


図.6 各波・各地方毎のピーク遅れ時間 [1]

4. 都市間結合を考慮した SIR モデル

上述のような都市毎に相関を持った感染者数推移を理解すべく、都市間人流交換効果を考慮した数理モデルの開発に着手した。従来の感染者ダイナミクスを記述する SIR モデルと呼ばれる数理モデルでは、日本全国の感染者の推移等の予測は可能であるが、都市毎の相互作用を考慮した予測は困難であった。本研究では、モデル開発の第一歩として2都市間の人流交換を考慮したモデルを提案した。

従来の SIR モデルでは、感受性保持者(Susceptible: S)、感染者(Infected: I)、免疫保持者(Recovered: R)の3変数を対象とし、以下のようなモデルで記述される。

$$\begin{aligned}\partial_t S &= -\beta SI, \\ \partial_t I &= \beta SI - \gamma I, \\ \partial_t R &= \gamma I,\end{aligned}$$

ここで、 β は感染確率、 γ は回復確率である。本モデルは、日本全国の感染者数推移の予測等で実際に使用されているが、このままでは、各自治体における感染者数の推移の予測は困難である。

そこで、都市間の人流交換効果を図.7のように SIR モデルに導入する。都市1から都市2への移動確率を α_{12} と与え、都市2から都市1への移動確率を α_{21} と与える。すると、感染に関わる感受性保持者と感染者は都市間に図.7中に示されている数だけ人流移動が起こる。ここで、簡単のために感染者の移動確率も感受性保持者と同確率であるとした。これは、多くの感染者が無症状であることを仮定している。このような人流交換を考慮すると、SIR モデルは以下のように拡張される。

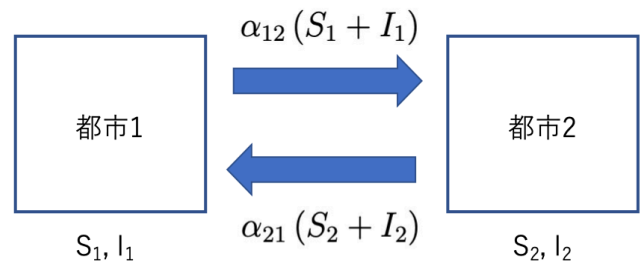


図.7 人流交換効果を考慮したモデル

$$\begin{aligned}\partial_t S_1 &= -\beta'_1 S_1 I_1 - \alpha'_1 (S_1 I_2 + S_2 I_1), \\ \partial_t I_1 &= \beta'_1 S_1 I_1 + \alpha'_1 (S_1 I_2 + S_2 I_1) - \gamma I_1, \\ \partial_t S_2 &= -\beta'_2 S_2 I_2 - \alpha'_2 (S_1 I_2 + S_2 I_1), \\ \partial_t I_2 &= \beta'_2 S_2 I_2 + \alpha'_2 (S_1 I_2 + S_2 I_1) - \gamma I_2,\end{aligned}$$

ここで、 S_j 、 I_j はそれぞれ都市 j の感受性保持者数、感染者数であり、各係数は以下のように定義される。

$$\begin{aligned}\beta'_1 &= \beta_1 (1 - \alpha_{12})^2, \\ \alpha'_1 &= \beta_1 \alpha_{21} (1 - \alpha_{12}), \\ \beta'_2 &= \beta_2 (1 - \alpha_{21})^2, \\ \alpha'_2 &= \beta_2 \alpha_{12} (1 - \alpha_{21}),\end{aligned}$$

都市間相互作用を取り込んだモデルでは、都市1の感染者数発展方程式に都市2の感染者数が入ってきており、都市間の結合を取り込んだ拡張モデルになっている事がわかる。

上記のモデルをもとに、都市間相互作用の影響を調べる。問題設定として、都市1は実効再生算数が1を超え感染が拡大しつつある地域、都市2は実効再生算数が1を切っており感染が収束している地域だとする。拡張モデルを数値的に解いた結果を図.8に示す。各変数の時間発展は図.8の左図に示されており、上段図は都市1の下段図では都市2の発展が示されている。都市間相互作用がない場合では、感染者数の増加は都市1でのみ起こり、都市2では感染爆発は起き得ない。一方で、都市間相互作用を考慮した場合は、有限の時間遅れを持って、都市2も感染増加が起こる事がわかる。またこの時の時間遅れを各都市における感染ピークの時間差 τ とする。人流移動確率 α_{ij} を変化させたシミュレーションを各パラメタ毎に行い、 τ の振る舞いを調べた。時間遅れ τ と都市間人流移動確率 α_{ij} の関係を図.8の右図に示す。人流移動確率が高くなるほど遅れ時間が短くなる事がわかる。すなわち、都市の感染ピークは流入する人流の制御によってコントロールすることが可能である。今後は、上記モデルをさらに拡張し、日本の地方別や各都道府県別の感染者数モ

デルに詳細な人流移動効果を導入することが重要となる。

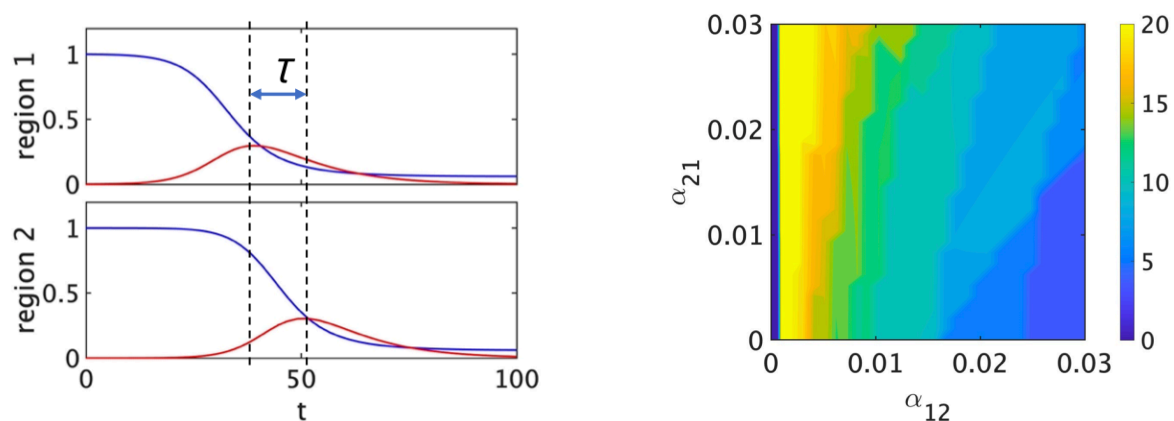


図. 8 (左図) 都市間相互作用を考慮した S_j, I_j の発展 (ここで都市 2 は実効再生算数が 1 以下)
(右図) 都市間結合係数と感染ピークの遅れ時間の関係

5. まとめ

本研究では、ジャックジャパン・厚生労働省の提供する COVID-19 の感染者情報をもとに感染症の年代・空間の伝播特性を解析した。年代別の時系列を抽出することで、20代を起点として年代空間への伝播が見えた。年代方向への伝播速度は、若年層側への伝播速度は約 $2[10\text{age}/\text{day}]$ に対し、中高年側へは約 $5.5[10\text{age}/\text{day}]$ と若者が中高年に比べて遅いことがわかった。また、時間・都市間の依存性において、ピーク遅れ時間から各波の感染起点を推定し、地方への伝播時間を評価した。解析結果を総合すると、概ね 10-20 日前後で全年代・全都道府県へ感染の波が伝播する事がわかった。

更に、得られたピーク遅れ時間の理解を目指し、都市間の人流移動効果を考慮した SIR モデルの開発を行った。今年度は拡張の第一歩として、2 都市間の相互作用を取り込んだモデルを提案し、都市間移動確率の大きさによって、各都市の感染増加が制御できる可能性を示した。

6. 謝辞

本研究は中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究 IDEAS202122 の助成を受けたものです。本研究前半部は日本大学生産工学部川崎凌君の卒業研究としての共同研究に基づくものです。

参考文献・データ

- [1]川崎凌、日本大学生産工学部卒業論文・卒業研究概要 (2021 年)
- [2]ジャックジャパン株式会社 <https://jag-japan.com/covid19map-readme/>
- [3]厚生労働省 <https://corona.go.jp/dashboard/>