

# 複雑ネットワーク構造を組み込んだ SIR モデルによる COVID-19 禍の「Go To トラベル」政策に関する シミュレーション分析

安武 公一<sup>†</sup>

小山 歩優<sup>‡</sup>

広島大学大学院人間社会科学研究科<sup>†</sup>

広島大学経済学部<sup>‡</sup>

## 1 はじめに

2019 年秋突如として出現した新型コロナウイルス SARS-CoV-2<sup>\*1</sup>による感染症 (COVID-19) はまたたく間に全世界に拡散し、パンデミックを引き起こした。2021 年 2 月末現在、パンデミックは未だ収束 (終息) していない。

COVID-19 が人の移動によって拡大したと言えること、あるいは、少なくとも COVID-19 の拡大とヒトの移動との間に相関関係がないとは言えないことは、すでにいくつかの実証研究によって明らかにされつつある [1, 4]。しかしながらわが国では人の移動に大きなインセンティブを与える「Go To トラベル」政策がパンデミック下の昨年夏に開始された。この政策がようやく一時中断されたのは、第 3 波とされる COVID-19 再拡大期に入ってしまった、2020 年 12 月 28 日である。

本研究では、シンプルな SIR モデルに複雑ネットワーク構造を導入したモデルによって、人の移動と感染症の拡大に関するシミュレーション分析を行う。微分方程式体系によって記述されている通常の SIR モデルは、「人のつながり」という人間社会の空間構造は考慮されていない。そのため微分方程式体系だけでは「人

の移動」と感染症の拡大の関係をうまくとらえることは難しい。「人の移動」と感染症の拡大が関係していると思われるのは、「人の移動」が新しい person-to-person transmission の場、すなわち新しい「人のつながり」をテンポラルにせよウイルスに与えるからである。社会における「人のつながり」の構造はネットワークによって表現することができる。本研究では、動的に変化するネットワーク構造を SIR モデルに組み込み、人の移動があるときとないときで感染症の拡大にどのような影響を観ることができるか、シミュレーション分析によって明らかにする。

## 2 モデル

分析に使ったモデルは次のような特徴を持っている。

1. 社会の人々のつながりを複雑ネットワークで表現した (図 1)。ここでノードは人であり、リンクは人のつながりである。
2. ノードは状態集合  $S := \{S, I, R\}$  のいずれかひとつの「状態」を持つ。 $S$  はまだ感染症に感染していない状態 (感受性の状態) (Susceptible),  $I$  は感染症に感染し他者にも感染可能な状態 (Infected),  $R$  は感染から回復もしくは死亡した状態 (Recovered or Removed) である。初期時点では全ノードの状態は  $S$  である。
3. 状態の推移は確率的に決まり、 $S \rightarrow I \rightarrow R$  と推移する。

---

A Note on simulation analyses with a SIR model on complex networks on *Go To Travel* policy in Japan

<sup>†</sup> Koichi Yasutake, Graduate School of Humanities and Social Sciences, Hiroshima University

<sup>‡</sup> Ayu Koyama, Faculty of Economics, Hiroshima University

<sup>\*1</sup> [6] によると少なくとも 10 月には発生していた。

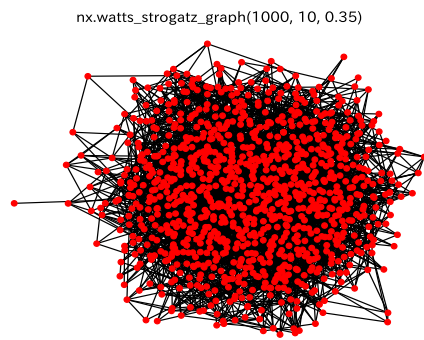


図1 シミュレーションに使った社会ネットワークの一例

4. モデルでは感染症は「人のつながり」(リンク)を通して伝播する。感染症に感染する確率は、外生的に与えられたパラメータ、ノード次数、そして隣接ノードの中の  $I$  の割合の増加関数として定式化される。この定式化には [5] による平均場近似の方法も参考にした。
5. 遷移確率に関するパラメータは通常の SIR モデルにしたがい、[3, 7] を参照して定めた。
6. 「人の移動」は任意のノード間の新しいリンクの出現と消滅で表現する。社会全体の人口の 20 % が「Go To トラベル」キャンペーンを利用すると仮定し<sup>\*2</sup>、人口の 20 % がランダムグラフ的に任意のノードと「出会う」ような環境を周期的に導入する。ただしこうして新しく付け加えられる「移動」を表現する環境はテンポラルなものであって、永続的なものではない。この環境は短い周期で生成消滅を繰り返す。

シミュレーションのアルゴリズムは次の通りである。

1. 社会的ネットワークを生成する。生成す

るネットワークは、Erdős-Renyi グラフ、Watts-Strogatz グラフ (Small World ネットワーク)、BA ネットワーク (スケールフリーネットワーク) である。

2. シミュレーション 1 回あたりに走らせる run time は 250 期として、同じネットワークを使って「Go To トラベル」あり、「Go To トラベル」なしのシミュレートを行う。同じ初期条件のもとでシミュレーションを 50 回繰り返す。繰り返すたびにネットワークは新しく生成する。
3. ネットワーク上の各ノードは「状態」の属性を持つ。全ノードの初期「状態」は  $S$  である。
4. 初期時点において状態が  $I$  であるノードを 1% の確率で任意に定める。
5. 状態の推移確率にしたがって全ノードの状態を推移させる。
6. 「Go To トラベル」を導入したモデルでは、複数の任意のノードは「移動」して一時的に新しい人々とつながりを持つ。この新しいつながりも人々の状態を推移させる可能性を持つ。
7. 「Go To トラベル」を導入しないモデルではネットワークは固定されている。すなわち新しいリンクの生成・消滅はなく人々は移動しない。
8. ほぼ定常状態になるまでシミュレーションを走らせる。

### 3 分析結果と考察

図 2 にシミュレーション結果の一例を示す。これだけを見ると「Go To トラベル」がある場合とない場合とではそれほど大きな違いはないように思われる。しかしながら、このヒートマップを生成したデータを試行回数にわたって (ヒートマップでは縦軸方向を上から下に) 平均をとった、累積感染者数比率の時系列的変化

<sup>\*2</sup> [2] によれば 2020 年 7 月 22 日から同年 10 月 31 日までの期間に Go To トラベル事業を利用した利用人数泊数は少なくとも約 3,976 万人泊である。

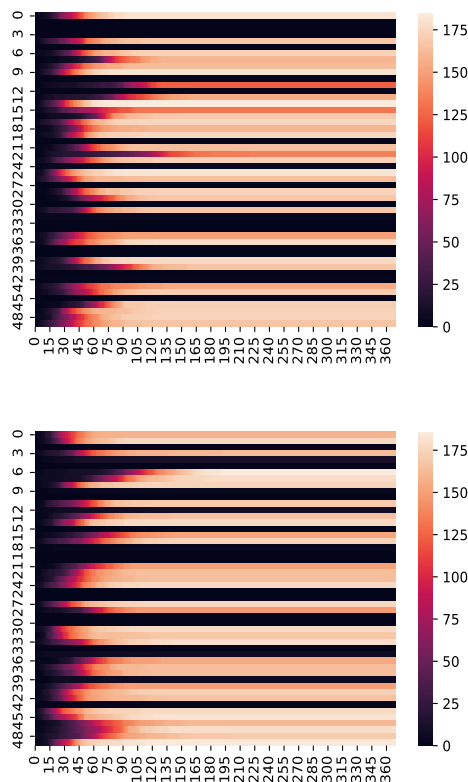


図2 シミュレーションによって得られたヒートマップの一例。上図は「Go To トラベル」がある場合の累積感染者数のヒートマップであり、下図は「Go To トラベル」がない場合の累積感染者数に対応したヒートマップである。横軸は左から右に1回あたりのシミュレーションの経過時間を示す。縦軸は上から下方向に試行回数をとる。色は累積感染者数に対応している。

(図3)と各状態にある人々の比率の時系列的变化(図4)を見れば分かるように、「人の移動」を促進した社会の方では明らかに状況は悪化している。累積感染者数(比率)は多く、そのピークに到達する時刻も早い。実際、t検定の結果からも、感染者数の平均値、累積感染者数には有意に差があることを示すことができる( $p < 0.01$ )。

考えてみればこれは当然の結果である。「人の移動」は偶発的な「人のつながり」をもたらすことにより、固定された日常環境以上に感染症への感染リスクを高める。本研究の結果はそ

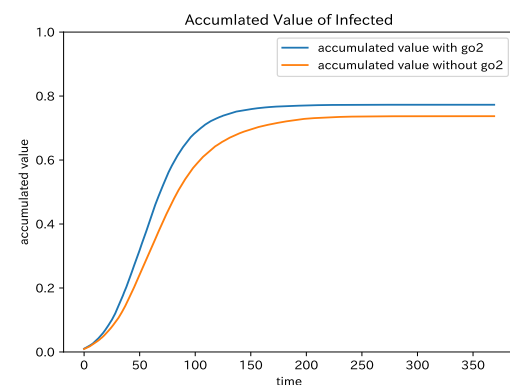
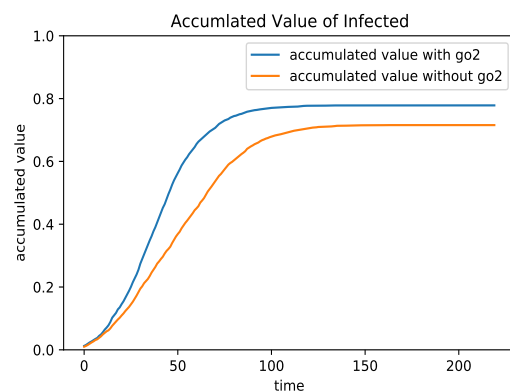


図3 累積感染者数の全人口に対する比率の推移に関するグラフ。上のグラフも下のグラフも緑色は「Go To トラベル」があった場合の累積感染者の時系列的な変化を、赤のグラフはそれがない場合の変化を表す。

の事実を示しているものと言える。

2021年2月末現在、「緊急事態宣言」の解除が目下のところCOVID-19対策に関する政策の焦点のひとつとなっている。しかしながら、感染症の拡大が完全には収まっていない段階で拙速に「人の移動」に大きなインセンティブを与える政策をとるならば、一時的な経済活動の再開はより長期的かつ悲惨な活動停止状況をもたらしかねない。単純なSIRモデルを使った本研究の結果からもそのことは明言することができる。

#### 4 まとめ

本研究では、シンプルなSIRモデルに複雑ネットワークの構造を導入したシミュレーショ

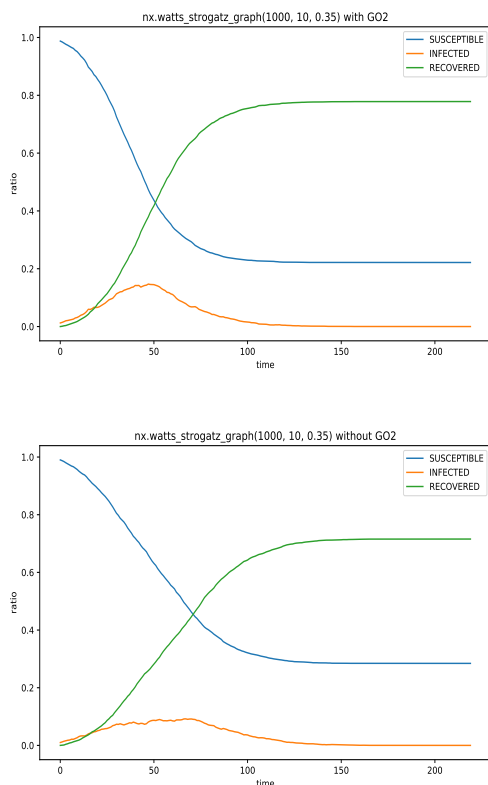


図4 感受性を持つ人々の割合（青）、感染者数の割合（黄色）、回復／死亡者数の割合（緑）の時系列的変化を示したグラフ。上図は「Go To トラベル」がある場合のケース、下図は「Go To トラベル」がない場合のケースである。

ン分析によって、「人の移動」は感染症の拡大（感染者数、累積感染者数の増加、感染のピーク期の到来を早めること）を有意にもたらす可能性があることを明らかにした。

本研究はきわめてシンプルな構造をしているため多くの拡張の方向を考えることができる。それはたとえば次のような問題である。

- 現在、現実には次々に SARS-CoV-2 の変異株が見つかったりしている。変異株への突然変異をモデルに導入する必要がある。
- 本研究のモデルのノードはすべて同質的である。しかしながら感染症に対する受容性はそれぞれの個体で異なる可能性がある。そのためノードの非同質性を導入したモデルに拡張する必要がある。

- 本研究で取り上げたのは単一階層のネットワークだけである。本研究のアイデアをよりリッチにとらえるならば、時間概念も導入した Multiplex あるいは Multilayer ネットワークによる分析へとモデルを拡張する必要がある。
- シミュレーションによる分析で現象論的な理解を得ることはできる。次に着手すべき課題は、現象の背後にあってこれを生成するメカニズムを解明することである。そのためにはより多くの解析的な研究が求められる。

## 参考文献

- [1] Asami Anzai and Hiroshi Nishiura. “Go To Travel” Campaign and Travel-Associated Coronavirus Disease 2019 Cases: A Descriptive Analysis, July – August 2020. *Journal of Clinical Medicine*, Vol. 10, No. 3, 2021.
- [2] 国土交通省観光庁. Go To トラベル事業における利用実績について, 2020. [https://www.mlit.go.jp/kankocho/news06\\_000484.html](https://www.mlit.go.jp/kankocho/news06_000484.html).
- [3] 國谷紀良, 稲葉寿. COVID-19 の数理モデル解析. 感染症の数理モデル. 培風館, 2020. 増補版.
- [4] 日本経済新聞. 感染再拡大, 旅行が原因 英が遺伝子解析で結論, 12 2020. <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGN110CH0R11C20A2000000/>.
- [5] R. Pastor-Satorras and A. Vespignani. Epidemic spreading in scale-free network. *Physical Review Letters*, Vol. 86, No. 14, pp. 3200–3203, 2001.
- [6] The Telegraph. Coronavirus pandemic may have started in october, says uk-french study, 2020. <https://www.telegraph.co.uk/news/2020/05/08/covid-19-pandemic-may-have-started-october-says->

uk-french-study/.

- [7] 東洋経済 ONLINE. 新型コロナウイルス  
国内感染状況, 2021. [https://toyokeizai.  
net/sp/visual/tko/covid19/](https://toyokeizai.net/sp/visual/tko/covid19/).