

4 1 COVID-19 の移動ネットワークモデルにより感染の不公平さと店舗の再開方法がわかる

スマートフォンの位置情報を経時的に解析して、人々の移動情報から COVID-19 に感染しやすい場所と、店舗などの再開の方法について数理モデルによる検討をしたスタンフォード大コンピューターサイエンス科の Leskovec からの報告です。

COVID-19 の危機により、感染防御策として人との接触を減少させ、人が集まる店舗なども閉鎖されたが、それらをいつ再開するのか、どの場所が安全か、さらにはどの程度の活動を許可するのかを計画する必要に迫られている。この問いに答えるには、移動の変化がウイルス拡散におよぼす変化を捉えるような疫学的な数理モデルが必要である。とくに、COVID-19 の「スーパー・スプレッダー」事例を見つけるには、様々な場所を訪れる際のいろいろな危険性を反映するモデルが必要であるし、よく話題にのぼる「感染率の格差」の問題にも、不利を被る集団におよぼす、不均衡なウイルスの影響を反映するモデルが必要になる。

そこで、今回、セルフォンの位置情報をもとに、キメの細かい動的な動きを捉えるネットワークを構築した。そして、この手法を、米国の 10 大都市に当てはめて感染の拡散状況を検討した。このネットワークは、国勢調査細分化グループ (census block groups, CVGs; 地理的単位で多くは 600 から 3,000 人を含むエリア) 内の 98,000,000 人の 1 時間ごとの移動データを特定の興味のある場所 (points of interest, POIs) と結びつけるものである。POIs とは、居住地ではなく、レストラン、小売店、宗教的な建物などを指す。このネットワークに疫学的数理モデルである、SEIR (Susceptible; 免疫なし, Exposed; 感染し潜伏期間中, Infectious; 発症者, Recovered; 回復者、という順に人が遷移していく過程を常微分方程式でモデル化したもの)モデルをあてはめて、CVGs、POIs それぞれの感染者の軌跡を追跡した。これによって実際の感染者数の推移との一致が見られたのみならず、それぞれの POIs の情報を捉えることによって店舗などの再開のタイミングを知ることができ、人種的や社会経済的に不利な集団がより感染リスクのあることが明らかになった。

1) 移動ネットワークモデル

モバイルフォンからの匿名の位置情報を提供する SafeGraph のデータ (2020 年 3 月 1 日から 5 月 2 日) を用いてネットワークを構築した。その結果、54 億の一時間ごとの移動データが、56,945 の CBGs と 552,758 の POIs との間で 2 部グラフとして可視化された。新規感染者は CBGs, POIs のいずれでも発生すると考え、CBGs から POIs への移動データをもとに、POIs の面積、滞在時間の中央値、発症者の時間ごとに変わる密度などを考慮して POIs の時間ごとの感染率を決定した。このモデルの変数は、1) POIs の感染率、2) CBGs の感染率、そして 3) 潜伏期間中の個人の最初の割合、の 3 つで、観察期間中は一定とした。その結果、このモデルと実際の 10 大都市での感染者数の推移はよく一致した。また、4 月 14 日までのデータのみで補正すると、さらにそれ以降の数値と一致した。このように、比較的単純な SEIR モデルに動的な移動ネットワークを加えることによって、政策の変更や人々の移動の変化にもかかわらず、感染者数をよく反映したモデルになった。

2) 移動制限と店舗再開の計画

① 米国における人々の移動は、2020 年 3 月に急激に減少した (シカゴでは、3 月の最初の週から 4 月の最初の週にかけ 54.7% の減少)。移動制限開始時期の違いと移動制限の程度の違いをシミュレートすると、両者は感染者数の減少に同程度重要であることがわかった。例えば、シカゴにおいて移動制限が 25% ではないと、予想感染者数の増加は 3.3 倍 (95%CI, 2.8-3.8) になり、一週間遅らせた場合の 1.5 倍 (95%CI, 1.4-1.6) より多かった。また、まったく制限なしでは、6.2 倍 (95%CI, 5.2-7.1) になった。移動制限は感染者数を劇的に減少させるのである。

② 大半の予想された感染者数は、少数の「スーパー・スプレッダー」によることがわかった。すなわち、シカゴでは 10% の POIs による感染者数は 85% (95%CI, 83%-87%) の感染者の原因になっていた。

③ もし少数の POIs が多数の感染を生むとすれば、ハイリスクの POIs を標的にするのが効果的である。そこで、店舗の再開モデルを検討した。その際に、定員の何割を再開するのかわる変数とした。定員制限せずに店舗を再開すると、予想感染者数の急増が見られた。シカゴでは、さらに 32% (95%CI, 25%-35%) が 5 月の終わりまでに感染することが明らかになった。しかし、最大定員を減

らすことは、来客を急激に減らさずに感染リスクを下げるができる。たとえば、シカゴでは、定員の20%削減は、新規感染者数を80%減らす、来客数は42%減少にとどまる。一律にPOIの訪問を減らすことと比較して、最大定員を減らすことは、もっとも感染リスクの高い客の密度が減少する結果、より感染者数が減少し効果的である。また、訪問者数はかわらないので経済的なコストも減少する。

④ 3月のデータから、ある業種のPOIは感染予想により多く寄与することがわかったので、ある業種を再開することは、より感染再燃のリスクが高いと考えた。そこで、5月1日に業種ごとに再開時の感染増大を検討した（人の動きが3月と同様であるとして）結果、業種ごとに感染拡大リスクが異なることがわかり、高い順に、1)接客をともしなう飲食店、2)ジム、3)ホテル、4)カフェ、5)宗教組織、6)接客をともしなわない飲食店、7)クリニック、8)食料小売店であった。これらの場所では、移動データからも客の密度が高く、滞在時間も長かった。

3) 感染の格差の特徴

CBGにおける人種（白人と非白人）と収入のデータ（上位と下位の十分位の収入）を考慮し、移動と感染状況を評価した。

- ① 人種と社会経済的に不利な状況にある集団では感染リスクが高いことがわかっていて、各都市において、収入が低い十分位の感染率は高い群と比較して感染率が高く、これは非白人においても同様であった。とくにこの傾向が顕著だったのはフィラデルフィアであった。この感染率の格差は、主としてPOIの種別（例えば接客をともしなうレストランや宗教施設）によることがわかった。
- ② 収入の少ないCBGs（低収入群）では、感染拡大による移動の減少が高収入群とくらべて少なかった。例えば、シカゴでは高収入群は27%多く移動が制限されていた。特に、低収入群では食料小売店への移動が多く、ここでの感染リスク拡大に寄与していた。
- ③ POIのなかでカフェやスナックバーは高収入群のほうがより訪れているが、低収入群の訪れるカフェやスナックバーの感染者数は全体のなかでも多くを占めた。これは、低収入群の訪れる場所が小規模で混雑しているためと考えられた。例えば、食料小売店で検討してみると、低収入の群は、面積

当たりの人数が 59%多く、滞在時間も 17%延長していた。このように、感染率はどのくらいの頻度でどこに行くかということが格差と関連していた。

- ④ 以上より、店舗の再開問題では、再開による全体への影響のみならず格差の影響も考えなければならない。例えば、シカゴにおける制限なしの全部の再開は、1ヶ月の間にさらに 39% (95%CI, 31%-42%)の感染増加を低収入群にもたすが、人口全体では 32% (95%CI, 25%-35%)である。また、シカゴにおいて定員の 20%での再開は、全体ではさらに 6% (95%CI, 4%-8%)の増加につながるが、低収入群では 10% (95%CI, 7%-13%)の増加になる。

このように、店舗再開における格差の問題を解決するためには、政策決定者は不利な条件のある集団に対して、以下の項目を補助する必要がある。

- 1) POI の専有率に関するより厳格な基準
- 2) 感染リスクの高い店舗での密度を下げるための緊急食料配布場所
- 3) 感染リスクの高い地域での無料で広く利用出来る検査体制
- 4) 必要不可欠な職種の人が病気で動けなくなった時に移動しなくて済むような有給休暇の改善と収入の見直し
- 5) 必要不可欠な職種の職場の感染予防の改善（良質の PPE、十分な換気、可能であれば距離をとるなど）

店舗の再開の問題に対して様々な方法の効果と公正さを評価できる新たな手法が必要であり、われわれの方法は、POI や住人の背景、都市の多様性を捉えることによってこの期待に応えるものである。

文献

- 1) Chang S, et al. Mobility network models of COVID-19 explain inequities and inform reopening. Nature 2020 doi: 10.1038/s41586-020-2923-3