

新型コロナウイルス (COVID-19) における 都市封鎖の効果推定*

Estimating effectiveness of lockdown for 2019 Novel Coronavirus Diseases (COVID-19)

倉橋節也[†]

筑波大学ビジネスサイエンス系
Graduate School of Business Sciences, University of Tsukuba

Abstract: This paper implements the infection process of 2019 Novel Coronavirus Diseases (COVID-19) in an agent-based model and compares the effectiveness of a virus testing rate and waiting days. In the model, 1,120 virtual residents agents live in two towns where they commute to office or school and visiting stores. The model simulates an infection process in which individuals were exposed to the risk of transmission of the novel coronavirus. In the experiment, 12 types of city lockdown scenarios were compared, and the results showed that the effect of suppressing the spread of infection varied greatly depending on the strength and timing of the lockdown measures. It has been shown that the early implementation of a lockdown can result in a short-term blockade to reduce the spread of infection. In addition, even if a newly infected person did not occur for 14 days, it was clarified that the infection could recur later.

1 はじめに

日本国内の新型コロナウイルス (COVID-19) 感染者数推移が日々増加している。東京都では、2020年3月下旬から急速に感染者数が増加し、4月からは100人に近い感染者が毎日発生するようになっている [1]。この推移の急激な変化は、政府による緊急事態宣言の発令による都市封鎖の開始が近づいていることを暗示しているように見える。

これまでの報告で、「新型コロナウイルス (COVID-19) における感染予防策およびイベント開催による影響の推定」 [2] と「新型コロナウイルス (COVID-19) におけるウイルス検査率と検査待機日数の影響推定」 [3] を通して、市民の側からの感染予防策とPCR検査の実施効果について、検証を行ってきた。本報告では、都市封鎖の影響を分析し、封鎖開始日の違いによる感染拡大効果と封鎖継続日数の比較を行う¹。

2 新型コロナウイルス (COVID-19) モデル

モデルは、先に報告した新型コロナウイルス (COVID-19) モデル [2] を使用した。

モデルには、隣接する2つの町があり、それぞれの住民が通勤や通学、商業施設利用などを定期的に行うことを想定している。一つの町には子供のいる四人家族と、大人だけの二人家族が住んでいる。子供のいる四人家族は100世帯あり、2人の親と2人の子供によって構成される。大人だけの二人家族は80世帯ある。合計で560人の住民が住んでいることになる。そして、同じ構成の町がもう一つあり、全体で1120人のモデルとなっている。親の10%が別の町に通勤し、他の親は日中に自分の町で働く。すべての子供は学校に通っている。医療サービスを提供する共同の病院が一つあり、各町から5人、合計10人が同じ病院で働いている。通勤をする両親のうち半分は電車通勤をしている [11]。二人家族の大人は高齢者を想定しており、通勤はしない。住民の中の大人は、確率 sr で定期的に商業施設やイベント会場などの人混みのある場所を訪れるように定義されている。

シミュレーションの各ラウンドは、住民全体の相互作用で構成されている。実行順序はランダム化され、住民エージェントは順次アクティブ化される。各ラウン

*Working paper: wp-2020-n04-r01

[†]連絡先: 筑波大学大学院ビジネス科学研究科
〒112-0012 東京都文京区大塚 3-29-1
E-mail: kurahashi.setsuya.gf @ u.tsukuba.ac.jp

¹rev. 0.1 表の誤記修正

ドで住民エージェントがアクティベートされると、相互作用として隣人との接触率 cr が確率的に発生し、接触した住民エージェントから伝播確率 tr に従って、感染が発生する。ここで、感染が発生する確率を罹患率 ir とし、次のように定義する。

$$ir = cr * tr \quad (1)$$

新型コロナウイルス COVID-19 の感染流行を詳細に分析した報告 [10][12] に基づき、次のように感染プロセスを定義した。感染から平均で 5 日間は潜伏期間だが、発症する 3 日前には、潜伏期間中にもかかわらず他者への感染力を持つ。潜伏期間が終了する 6 日目に発熱、咳、下痢などが出現する。発熱後、ベースモデルでは 50% の確率で病院で受診し、自宅待機となる。残りの 50% の感染者は、症状が重くないことから解熱剤などで自己治療し、通勤通学を続ける。発熱が 4 日以上続いて病院を受診した人は PCR 検査を行い、翌日に検査結果が出て、感染者は入院となる。PCR 検査の実施率は 50% とした。発生している死亡者数に対して、推定される感染者数が大幅に少ないことから、検査の補正率を半分程度と推定した。感染から 20 日後に、20% の感染者が重症・重篤となり、事前に受診しなかった人も病院に搬送され入院する。そして、感染から 41 日までに若年者は 0.06%、成年者は 0.21%、高齢者は 1.79% が死亡する。軽度の感染者は感染後 27 日、死亡を免れた重度入院者も 49 日までに回復し、一時的に免疫を獲得するものとした。

3 東京都における感染者数の推移

2020 年 4 月 3 日時点の東京における感染者数推移 (図 1) を見ると、2020 年 2 月中旬から感染者が報告されるようになっていたが、概ね 10 人/日以下の感染者であった。しかし 3 月下旬から状況は一変し、3 月 25 日には 41 名、4 月 2 日には 91 名の新たな感染者が報告されてきている。図 1 から、初期の段階から 4 月 3 日まで継続して感染者数増加率は 1.1 を超えて一定であり、それと連動して感染者の確認数は急上昇してきている。このように、増加率が定常的に 1.0 を超えることは加速度的に感染者数を増やすことを意味し、この数値の変化を注視する必要がある。

4 都市封鎖による影響推定

これまで報告したモデルでは、初期の段階から感染予防策を講じた場合の感染推移を推定してきたが、本稿では、感染者数がすでに加速度的に上昇し始めている状況の中で、都市封鎖という強硬な予防策を講じた

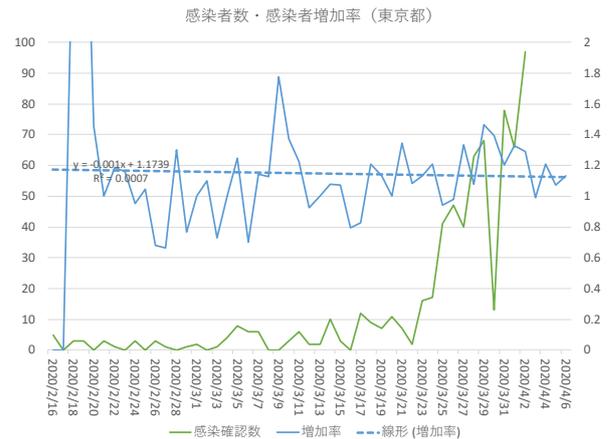


図 1: 感染者数・感染者増加率の推移 (東京都)

場合の効果について推定することを目的とする。イタリアやスペインをはじめとする西ヨーロッパ諸国やアメリカにおいて、また中国やフィリピンといったアジア諸国においても、この都市封鎖の手段が最終的に採用されている。しかし、この手段の経済的社会的影響は甚大であり、安易に選択することは避けなければならない。一方で、強力な最終手段であっても、その実施時期を間違えると、効果が限定的となる可能性もある。この点を明らかとするために、以下のような設定で感染モデルを構築する。

封鎖強度 時差通勤やテレワークなどによる通勤者の減少と、学校閉鎖による通学者の減少、そしてショッピングや旅行などの外出自粛を組み合わせた封鎖強度を想定し、それらの強度として、50%減少、70%減少、90%減少を設定する。

封鎖開始 封鎖を開始する時期による影響を推定するために、最初の感染者が発生してから 30 日後、40 日後、50 日後、60 日後の封鎖開始シナリオを設定する。

封鎖解除 封鎖を解除する条件として、2 週間 (14 日間) 連続して新規感染者数が 0 になることを条件とする。

封鎖再開 封鎖解除を行った後でも、不顕生の感染者が感染を拡大するリスクが残るため、新規感染者が一定数発生した場合に封鎖を再開する。ただし、最もマイルドな 50% 減少の封鎖強度とする。

積極的疫学調査 現在日本においては、感染者のリンクを辿り PCR 検査と隔離を実施する積極的疫学調査が採用されている。次のように、その効果をモデルに実装する。1) PCR 検査陽性者に対して

濃厚接触者の追跡調査を実施。2) 家族 100%, 職場・学校 80%, 店舗等外出時の接触者 40%で濃厚接触者を特定し, PCR 検査と病院隔離を実施。ただし追跡遅れを 1 日とする。

以上の設定を組み合わせた 12 種類の封鎖シナリオを定義し実験を行う。

- B1 ベース (対策なし): テレワーク 0%, 学校閉鎖 0%, 店舗等外出率 0.3
- L1 感染発生後 30 日後に 50%封鎖策 (積極的疫学調査, 時差通勤, テレワーク 50%, 学校閉鎖 50%, 店舗等外出率 0.2) を実施
- L2 感染発生後 30 日後に 70%封鎖策 (積極的疫学調査, 時差通勤, テレワーク 70%, 学校閉鎖 70%, 店舗等外出率 0.1) を実施
- L3 感染発生後 30 日後に 90%封鎖策 (積極的疫学調査, 時差通勤, テレワーク 90%, 学校閉鎖 90%, 店舗等外出率 0.05) を実施
- L4 感染発生後 40 日後に 50%封鎖策を実施
- L5 感染発生後 40 日後に 70%封鎖策を実施
- L6 感染発生後 40 日後に 90%封鎖策を実施
- L7 感染発生後 50 日後に 50%封鎖策を実施
- L8 感染発生後 50 日後に 70%封鎖策を実施
- L9 感染発生後 50 日後に 90%封鎖策を実施
- L10 感染発生後 60 日後に 50%封鎖策を実施
- L11 感染発生後 60 日後に 70%封鎖策を実施
- L12 感染発生後 60 日後に 90%封鎖策を実施

ベースモデルの設定パラメータは, 先行研究 [2] と同じ値を用いて設定した (表 1)。

パラメータ名	設定値
発熱後自宅待機率	0.50
通勤時電車内接触率	0.07
職場・学校接触率	0.13
店舗等外出接触率	0.07
自宅接触率	0.41

表 2 に, それぞれの都市封鎖策の設定パラメータを示す。

4.1 基本モデルによるシミュレーション結果と妥当性検証

これらのパラメータを使用して, それぞれの対策毎に 100 回のシミュレーションを実施した。それぞれの試行で一様分布の乱数シードを変更する確率変数の対象は, 最初の 1 名の感染者の属性と住居, 通勤先の職場内の座席位置, 通学先の学校内の座席位置, 通勤電車内の乗車位置, 商業施設 (イベント会場) 内の訪問位置, 病院内の在室位置とした。

図 2 に, B1 に積極的疫学調査を加えた実験 (B2) を 100 回実施した結果の感染推移を示す。B2 では, 都市封鎖を実施せず積極的疫学調査のみを行っている。ただし, 100 回の実験結果を時系列に沿って集計し期待値を求めるため, 感染速度のばらつきによりピークが低く見積られる傾向がある。

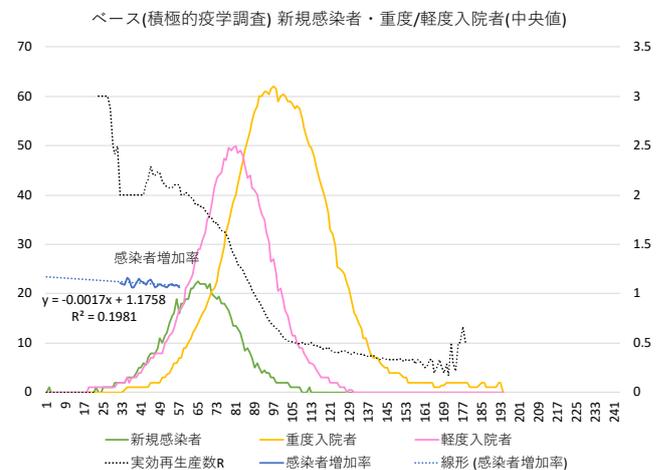


図 2: B2:積極的疫学調査モデルによる死亡者・軽度/重度入院者数/日・相対感染速度の推移

この感染推移の傾向は, 中国武漢で記録された感染推移 [10] とほぼ一致する。武漢においては, 最初の感染者が確認されてから, 感染確認のピークを迎えるまでに約 60 日かかっている。モデルの推移においても, 最初の感染者が発熱し陽性が確認されるのは感染者が都市に入ってからほぼ 20 日目であり (100 回の中央値), ピークを迎えるまでに約 60 日を要している。また, 実効再生産数は感染初期の段階で 3.0 近辺となっているが, 感染者数が増加するにつれて減少し, 90 日後に 1.0 を割り込む結果となっている。中国武漢での感染において WHO が報告した基本再生産数 R_0 は, 介入がされていない 1 月 23 日以前で 2~2.5 であり, 本モデルでの感染前半フェーズでの推定値 2~2.3 とほぼ一致する。同様に, 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議の報告「新型コロナウイルス感染症対策の状

表 2: 都市封鎖モデルパラメータ

対策	B1:ベース (対策なし)	L1:30 日後 封鎖 50%	L2:30 日後 封鎖 70%	L3:30 日後 封鎖 90%	L4:40 日後 封鎖 50%	L5:40 日後 封鎖 70%	L6:40 日後 封鎖 90%
テレワーク	0%	50%	70%	90%	50%	70%	90%
学校閉鎖	0%	50%	70%	90%	50%	70%	90%
時差通勤	-	時差	時差	時差	時差	時差	時差
店舗等外出/日	0.30	0.20	0.10	0.05	0.20	0.10	0.05
積極的検査調査	-	実施	実施	実施	実施	実施	実施
封鎖開始日	-	30	30	30	40	40	40
対策	L7:50 日後 封鎖 50%	L8:50 日後 封鎖 70%	L9:50 日後 封鎖 90%	L10:60 日後 封鎖 50%	L11:60 日後 封鎖 70%	L12:60 日後 封鎖 90%	
テレワーク	50%	70%	90%	50%	70%	90%	
学校閉鎖	50%	70%	90%	50%	70%	90%	
時差通勤	時差	時差	時差	時差	時差	時差	
店舗等外出/日	0.20	0.10	0.05	0.20	0.10	0.05	
積極的検査調査	実施	実施	実施	実施	実施	実施	
封鎖開始日	50	50	50	60	60	60	

況分析・提言」での、国内での実効再生産数とも近似している [4][5]、また、感染初期フェーズでの感染者増加率も、東京都において $y = -0.0017x + 1.17$ 、本モデルでは、 $y = -0.001x + 1.17$ と近似している。これらの複数の出現パターンは、モデルの設定パラメータとして定義していない創発的パターンであり、パターン指向モデルの検証手法 [6] に基づいた本モデルの妥当性を示す結果となっている。

4.2 都市封鎖策実施によるシミュレーション実施結果

都市封鎖の影響を比較したシミュレーション実験結果を表 3、表 4、図 3、図 4 に示す。

図 3 から、B1:ベース（対策なし）と比較して、感染開始から 30 日後に都市封鎖策を実施した L1~L3 のそれぞれ場合において、都市封鎖率の強弱に応じて軽度入院者、重度入院者数が大幅に減少している。一方で、感染開始から 60 日後に都市封鎖策を実施した L10~L12 では、封鎖の効果が L1~L3 に比べて大幅に減少している。封鎖日数においては、L1 の 165 日間に比べて L3 は 47 日間と、72%も短縮できている。この傾向は、L4~L12 でも同様である。これらから、封鎖開始日を早めることと、封鎖をするのであれば、強い封鎖策を用いた方が、短期間で大きな効果を得ることがわかる。

5 議論

封鎖策の強弱と開始時期によって、感染拡大の抑制効果がはっきりと現れたが、しかし、L1~L3 に比べて L4~L12 の封鎖日数を見ると、封鎖開始日を遅らせた方が封鎖日数が減少することが観測された。この原因を調べるため、それぞれのシナリオにおける感染推移

状況と封鎖実施状況を、100 回のシミュレーション結果の中央値付近での結果を取り出して比較確認を行う。

図 5 に、L1~L12 までの感染推移状況の代表的事例を示す。赤い点線が、都市封鎖策を実施した期間（横軸）と封鎖強度（縦軸）を表している。上段左側の感染 30 日後封鎖 50%開始の場合は、感染がなかなか終息せず 165 日間の長期間にわたって封鎖を続けている。上段中央の感染 30 日後封鎖 70%開始の場合は、最初の封鎖によって、短期間で感染数 0 が 12 日間継続したため封鎖を解除したが、その後再び感染が広がったため、二度目の封鎖を実施している、結果的に、合計で 145 日間の封鎖となっている。上段右側の感染 30 日後封鎖 90%開始の場合は、最初の封鎖が強力だったことにより、一気に感染終息が達成され、47 日間で封鎖を解除できている。その後の再発も見られない。一方で、下段の感染 50 日後封鎖あるいは感染 60 日後封鎖の場合は、封鎖策の強弱の差による違いは多少見られるものの、感染の拡大抑制効果は薄く、対策なしに比べて、入院者数を大幅に減少させることができていない。これは、封鎖策の発動遅延により、感染が市中に一気に広がり多くの市民が抗体を持つか死亡することで、自然に感染が終息したことを示している。

本モデルでは、新たな感染者が 14 日間発生しなかったときに、自動的に封鎖を解除するように設計されている。潜伏期間を考えれば、14 日間は十分のように思えるが、多くの場合で感染再発が確認された。どのようなメカニズムで、感染が再発したのかを考えてみる。このウイルスの特徴は、感染者の約半数に自覚症状が現れないことが確認されている [7][13]。また、風邪とよく似た症状のまま、自然に治癒してしまう性質を持っており、特に若い人にその傾向が見られる。感染者であっても発熱症状などが現れず、感染が確認されないまま、生活を行い市中を移動することが予想される、その結果として、14 日間を過ぎても、感染者の再発が発生していると思われる。このように、不顕生あるいは

表 3: 都市封鎖策実施シミュレーション結果 (中央値)

	B1:ベース (対策なし)	L1:30 日後 封鎖 50%	L2:30 日後 封鎖 70%	L3:30 日後 封鎖 90%	L4:40 日後 封鎖 50%	L5:40 日後 封鎖 70%	L6:40 日後 封鎖 90%
終息日数	156	238	214	87	212	164	104
軽度入院数/日	58	23	19	9	29	21	18
重度入院数/日	70	18	11	3	22	11	8
若年重度入院数/日	6	3	2	0	3	2	1
成年重度入院数/日	18	7	5	2	9	5	3
高齢重度入院数/日	51	11	7	1	12	6	4
封鎖日数	-	165	145	47	138	106	54
	L7:50 日後 封鎖 50%	L8:50 日後 封鎖 70%	L9:50 日後 封鎖 90%	L10:60 日後 封鎖 50%	L11:60 日後 封鎖 70%	L12:60 日後 封鎖 90%	
終息日数	167	152	117	165	141	126	
軽度入院数/日	33	32	32	47	47	50	
重度入院数/日	24	17	15	36	28	23	
若年重度入院数/日	3	3	2	4	3	3	
成年重度入院数/日	9	8	6	13	10	10	
高齢重度入院数/日	14	9	8	21	13	11	
封鎖日数	93	84	58	79	70	54	

表 4: ベースに対する都市封鎖策実施の影響比 (中央値)

	B1:ベース (対策なし)	L1:30 日後 封鎖 50%	L2:30 日後 封鎖 70%	L3:30 日後 封鎖 90%	L4:40 日後 封鎖 50%	L5:40 日後 封鎖 70%	L6:40 日後 封鎖 90%
終息日数	1.00	1.52	1.37	0.55	1.36	1.05	0.67
軽度入院数/日	1.00	0.40	0.33	0.16	0.50	0.37	0.30
重度入院数/日	1.00	0.26	0.16	0.04	0.31	0.16	0.11
若年重度入院数/日	1.00	0.50	0.33	0.00	0.50	0.33	0.17
成年重度入院数/日	1.00	0.39	0.28	0.08	0.50	0.28	0.17
高齢重度入院数/日	1.00	0.22	0.14	0.02	0.24	0.12	0.08
	L7:50 日後 封鎖 50%	L8:50 日後 封鎖 70%	L9:50 日後 封鎖 90%	L10:60 日後 封鎖 50%	L11:60 日後 封鎖 70%	L12:60 日後 封鎖 90%	
終息日数	1.07	0.97	0.75	1.05	0.90	0.81	
軽度入院数/日	0.57	0.55	0.56	0.82	0.82	0.87	
重度入院数/日	0.34	0.24	0.21	0.51	0.39	0.33	
若年重度入院数/日	0.50	0.42	0.33	0.67	0.50	0.50	
成年重度入院数/日	0.50	0.44	0.33	0.72	0.56	0.53	
高齢重度入院数/日	0.26	0.18	0.16	0.41	0.25	0.22	

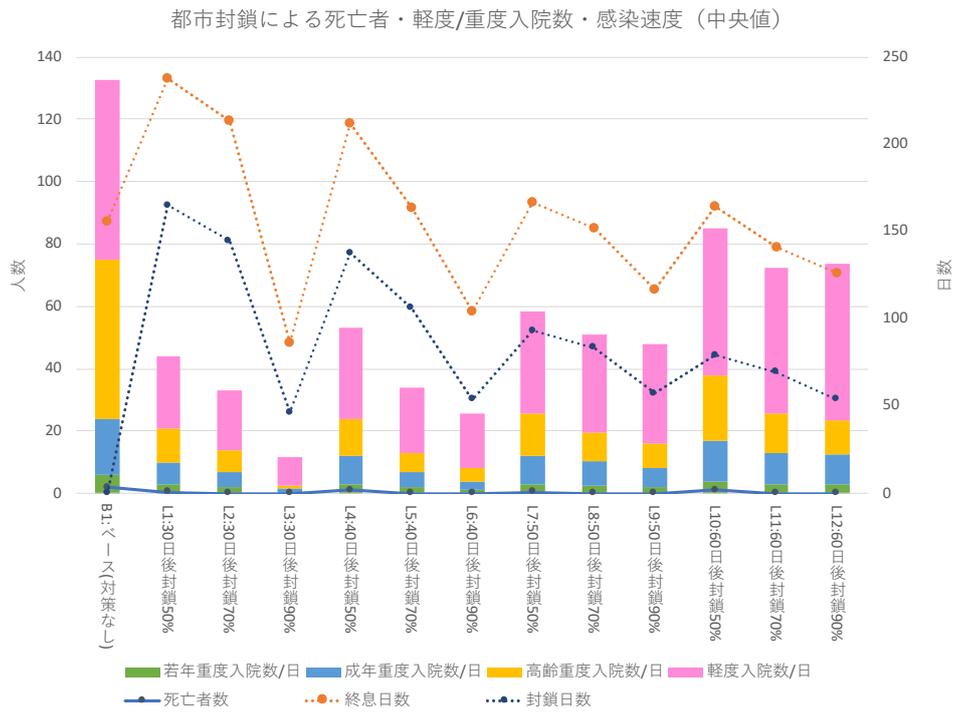


図 3: 都市封鎖策による死亡者・軽度/重度入院者数/日・相対感染速度（中央値）の影響比較

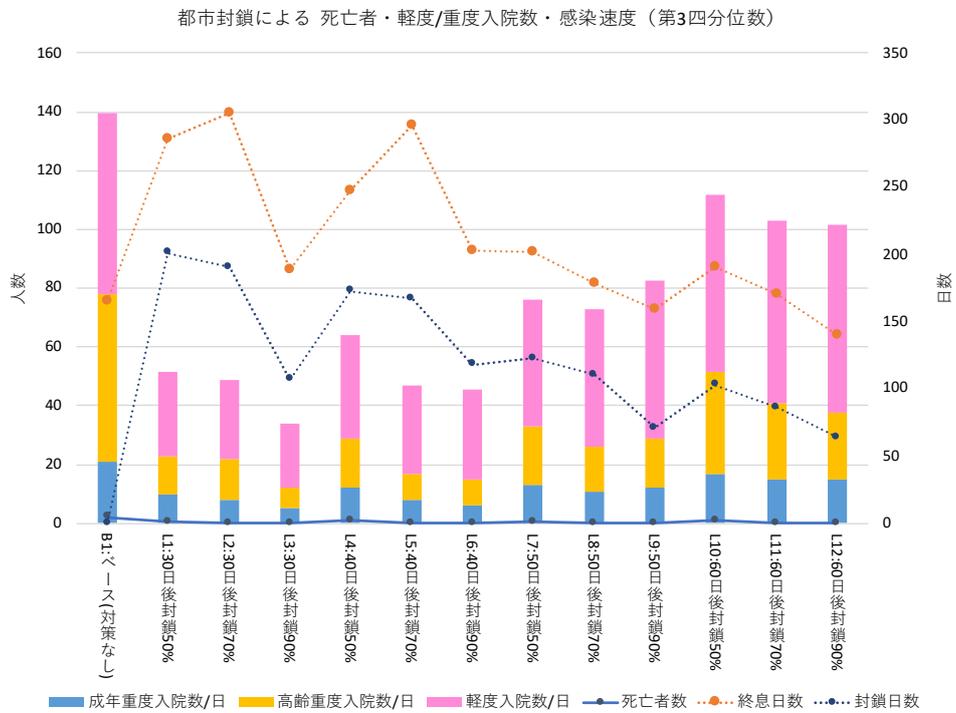


図 4: 都市封鎖策による死亡者・軽度/重度入院者数/日・相対感染速度（第3四分位値）の影響比較

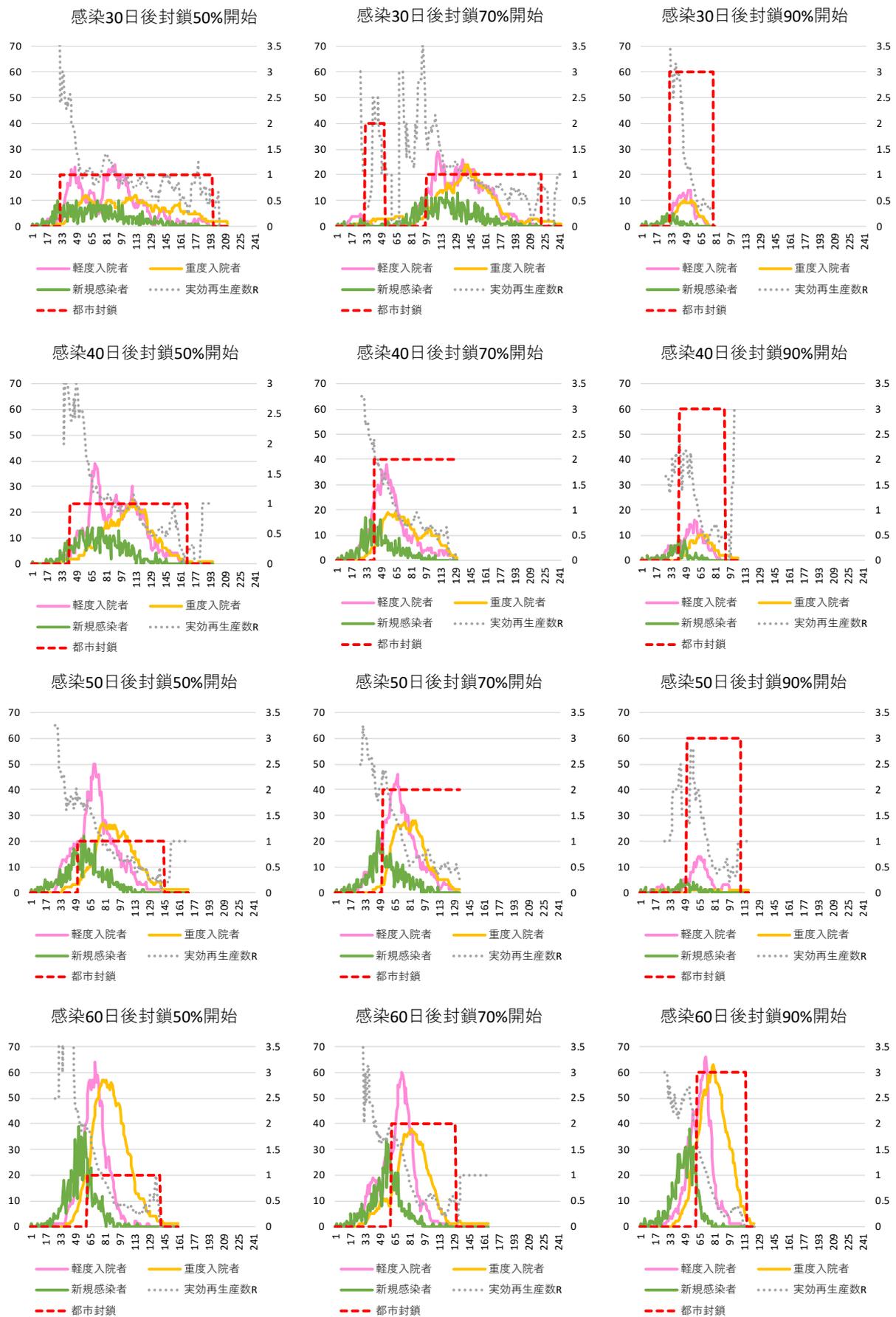


図 5: 封鎖シナリオごとの感染推移例

症状の軽い感染者が大きな割合で存在することが、新型コロナウイルスの感染拡大の危険性を示している。

6 まとめ

本報告では、新型コロナウイルスの感染プロセスをエージェントベースモデルに実装し、複数の都市封鎖策シナリオを策定してそれらの効果の比較を行った。モデルでは、1120人の仮想的な住民エージェントが通勤通学および店舗等への訪問を行い、新型コロナウイルスの感染リスクに晒されている状態を模擬した。実験では12種類の都市封鎖シナリオ比較実験を行い、その実験結果から、封鎖策の強弱と開始時期によって、感染拡大の抑制効果が大きく異なり、感染拡大が予想される場合に、できるだけ早期に強力な都市封鎖策を実施することが、結果的に短期間の封鎖で感染拡大を抑制できることを示した。また、新規感染者が14日間発生していない場合でも、その後に感染が再発する可能性を明らかにした。

一方で、都市封鎖は、社会的経済的影響が甚大であり、その実施は慎重にならざるを得ない。本研究では、都市封鎖に加えて、感染者の濃厚接触者を特定し、検査と隔離を実施する積極的疫学調査の機能をモデルに実装し、その感染抑制効果を確かめた。また、PCR検査法に代表されるウイルス検査の検査率と検査待機日数の影響についての比較検討の結果 [3] から、自覚症状の有無に捉われない受診と検査の実施、及び検査待機時間の短縮が、感染拡大抑制に大きな効果をもたらす可能性が示されており、サーベイランスとこれらと組み合わせた都市封鎖が有効である。

本報告では、速報性を重視することから、できる限り最新のデータを使用したが、日々新しい報告が届いており、現在までの限られた情報に基づいていることは、この報告の限界である。また、実験で用いたモデルは抽象度が比較的高く、現実の感染状況を忠実に再現することを企図していない。よって、感染者数や感染速度の絶対値ではなく、相対的な比較を目指したものととなっていることを考慮されたい。

参考文献

- [1] 都内の最新感染動向, 東京都新型コロナウイルス感染症対策サイト, <https://stopcovid19.metro.tokyo.lg.jp/>, 2020.4.3(2020)
- [2] 倉橋節也: 新型コロナウイルス (COVID-19) における感染予防策およびイベント開催による影響の推定, Working paper 2020/3/23a (2020)
- [3] 倉橋節也: 新型コロナウイルス (COVID-19) におけるウイルス検査率と検査待機日数の影響推定, Working paper 2020/3/23b (2020)
- [4] 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議: 新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言 (2020年3月19日), <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000610566.pdf> (2020)
- [5] 新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言, 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議 (2020年4月1日)
- [6] Grimm, V.: Pattern-Oriented Modeling of Agent-Based Complex Systems: Lessons from Ecology, *Science*, Vol. 310, pp. 987–991 (2005)
- [7] World Health Organization, Q&A on coronaviruses (COVID-19), <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/q-a-coronaviruses>, (2020)
- [8] 厚生労働省: 新型コロナウイルスに関する Q&A, https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/dengue_fever_qa_00004.html#Q5, 2020.3.11 (2020)
- [9] 国立感染症研究所: 新型コロナウイルス感染症患者に対する積極的疫学調査実施要領 (2020年3月12日暫定版), <https://www.niid.go.jp/niid/images/epi/corona/2019nCoV-02-200312.pdf>
- [10] The Novel Coronavirus Pneumonia Emergency Response Epidemiology Team: The Epidemiological Characteristics of an Outbreak of 2019 Novel Coronavirus Diseases (COVID-19) China, 2020 *China CDC Weekly*, 41(2):145-151. doi: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2020.02.003 (2020)
- [11] 総務省統計局: 利用交通手段, 2000年国勢調査, <https://www.stat.go.jp/data/kokusei/2000/jutsu1/00/04.html> (2020)
- [12] WHO-China: Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19), WHO-China Joint Mission Members, <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/who-china-joint-mission-on-covid-19-final-report.pdf>, (2020)

- [13] 新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) 無
症状病原体保有者 3 例の報告, 日本感染症
学会, <https://doi.org/10.1148/radiol.2020200642>
(2020)