

新型コロナウイルス (COVID-19) における感染予防策の推定 - Working paper 2020/3/6 rev.1 -

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

倉橋節也*

筑波大学大学院ビジネス科学研究科

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 multiple infection prevention measures. 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 they were exposed to the risk of transmission of the novel coronavirus. The results of the experiments showed that individual infection prevention measures (commuting, teleworking, class closing, contact rate reduction, staying at home after fever) alone or partially combined them do not produce significant effects. On the other hand, if comprehensive measures were taken, it was confirmed that the number of deaths, the infection rate, and the number of hospitalised patients per day were decreased up to 25%, 58.4%, 61.3% at the median respectively.

1 はじめに

2019年12月頃に中国湖北省武漢で発生した新型コロナウイルス (COVID-19) は、2020年1月に広東省で感染が確認され、2月には31の省で感染が確認されている [1]。また、世界各国へも感染が広がりつつあり、2020年2月21日現在では、29の国と地域 (香港, マカオ) で感染者が確認されている。死亡者数は、中国において2200名を超え、各国で死亡者が発生し始めている。日本では、2月21日現在で79名の患者と無症状病原体保有者14名が確認され、クルーズ船においては634名に陽性が確認されている [2]。このような状況において、厚生労働省や各自治体、研究機関、メディアから、さまざまな感染予防策が提示されている。例えば厚生労働省では、石鹸やアルコール消毒液などによる手洗い、咳などの症状がある場合は咳エチケット (マスク、ティッシュなどで口や鼻を覆う)、持病のある人は公共交通機関や人混みの多い場所を避ける、などが推奨されている [3]。一方で、各企業や自治体から感染防止対策が指示されており、濃厚接触者の在宅勤務指示 [4]、テレワークや時差出勤 [5]、外出や対面の会議を避ける [6] などが推奨されている。

また、中国で発生した感染事例において、Flow-SEIR

モデルを適用して感染数を推定した結果が報告されている [7]。それによれば、交通の遮断と検疫の2要因に対して効果を推定し、検疫が1週間以前に行われれば、感染のピーク数は90%近く減少し、交通遮断では21-22%程度の緩和が見込めることが示されている。

しかし、テレワークや学級閉鎖など、さまざまな感染予防策に対して、データが限られる中で、新型コロナウイルスへの効果を網羅的に推定することは困難である。この課題に対し、本論文において、エージェントベースモデリング手法を用いた感染症モデルによって、それらの効果の比較推定を実施した結果を報告する。

2 関連研究

2.1 天然痘の感染シミュレーションモデル

Epstein[8][9] は、1950年から1971年までのヨーロッパの49の流行に基づいて、天然痘モデルを作成した。このモデルでは、2つの町の100世帯が調査された。家族には2人の親と2人の子供が含まれており、各町の人口はそれぞれ400人となっていた。別の町に行く10%の親以外は、全員の大人は日中に町で働き、すべての子供は学校に通う。2つの町に医療サービスを提供する共同病院があり、各町から5人ずつが働いている。このモデルは、エージェントベースのモデルとして設

*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

計され、このモデルを使用して感染症のシミュレーションが行われた。

2.2 感染症のインディビジュアルベースモデル

大日 [10] は、感染症のインディビジュアルベースのモデルを使用して天然痘対策を評価した。モデルは、10,000 人の住民と公衆衛生センターを含む町を想定していた。モデルでは、1 人がショッピングモールで天然痘ウイルスに感染するところから始まり、ワクチン接種対策を比較した。シミュレーションの結果、感染の初期段階の拡散率が高く、医療スタッフの数が少ない場合、追跡ワクチン接種の効果は低下するが、集団ワクチン接種の効果は安定していることがわかった。したがって、ウイルスが拡散し始めるときは、タイムリーで集中的な集団ワクチン接種が必要とされた。また、麻疹の流行研究では、アイルランドの町での空気感染の広がりをシミュレートするためのデータ駆動型のエージェントベースモデルとして、疫学ダイナミクスを再構築するためのフレームワークを使用して、麻疹伝播のエージェントベースのシミュレーションモデルが開発された [11] [12]。

2.3 エボラ出血熱・風疹モデル

2014 年に西アフリカで発生したエボラ出血熱の流行は、28600 名を超える感染者を出し、11308 名が死亡するという大惨事となった [13]。エボラウイルスの感染力は強いが、空気感染ではなく、感染者の体液（嘔吐物、血液、肉、唾液、粘液、排泄物、汗、涙、母乳、精液など）に接触したことで感染すると考えられている。咳やくしゃみの中にウイルスが含まれている危険性も有り、感染者への 1 メートル以内での感染リスクは高い。倉橋 [14] は、WHO の調査報告を参考に感染プロセスを定義し、実験を行なった結果、集団ワクチン接種に比べて、追跡ワクチン接種の有効性を確認した。

また、風疹においては、特に日本では男性と女性の抗体保有率に差があること、性別が別れた職場の影響を考慮する必要があることから、それらをモデルに組み込んだ研究が行われた [15]。その結果、感染拡大は、抗体を保有していない男性が多い職場で始まるのが推察され、男性の抗体保有率を高めることが、全体の感染拡大を防ぐ重要な対策となることが明らかとなった。

2.4 関連研究のまとめ

これらの研究から、エージェントベースのモデルの有効性が明らかになったが、新型コロナウイルスでは、

免疫を持つ人がいないことや潜伏期間中においても感染が発生する可能性が示唆されていること [16]、テレワークや時差出勤、商業施設やイベントなどの人混みを避けるなど、さまざまな情報が発信されているにも関わらず、これらの効果についてはほとんど言及されていない状況にある。よって、本報告では、これらの効果についての比較シミュレーション実験を行うことを目的とする。

3 新型コロナウイルス (COVID-19) モデル

ベースとなるモデルは、これまでの感染症研究で妥当性評価がすでに行われているエボラ出血熱モデル [14] および風疹モデル [15] を用い、これに新型コロナウイルスの感染プロセスを実装する。

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 [17]。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。各ラウンドで住民エージェントがアクティブになると、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。

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

感染から 12 日間は潜伏期間だが、感染から 8 日後には、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 13 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。感染から 22 日後に、18%の感染者が重篤となり、病院に搬送され入院する。そして、感染から 26~28 日の期間で 0.4%が死亡する。この死亡率は、中国の湖北省以外の事例を参考にした。湖北省、特に武漢においては、死亡率は 5%を超えるが、これは多数の感染者が一気に発生し、医療体制が追いつかない状態で死亡者数が急増したと推定されるため、他の地域の死亡率を採用した [1]。残りの感染者は回復し、一時的に免疫を獲得するものとした。

モデルのパラメータを表 1 に示す。

モデル	パラメータ
通勤者数	400
通学者数	400
高齢者数	320
通勤比率	0.5
店舗訪問率/日	0.1
伝播確率/接触	0.2

それぞれの対策の設定パラメータを表 2, 表 3, 表 4 に示す。

4 シミュレーション実験設定

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（表 5）。

図 1 に実行画面の例を示す。図の上部と下部に隣接する 2 つの町が配置され、4 人家族と 2 人家族の合わせて 1120 名が居住している。中央のオレンジの部分は通勤電車を、左のピンクの部分は商業施設（イベント会場）を、右の淡いグレーの部分は病院を、濃いグレーの部分は遺体安置所を表している。図には現れていないが、右半分の上下に、それぞれ通勤先の職場と通学先の学校が設定され、4 人家族の居住者は毎日それぞれの場所に通う設定となっている。

5 シミュレーション実施結果

表 6, 表 7, 表 8 に、それぞれの感染予防対策におけるシミュレーション実施結果を示す。これらの表では、感染予防対策のそれぞれに対する、死亡者数、終息日

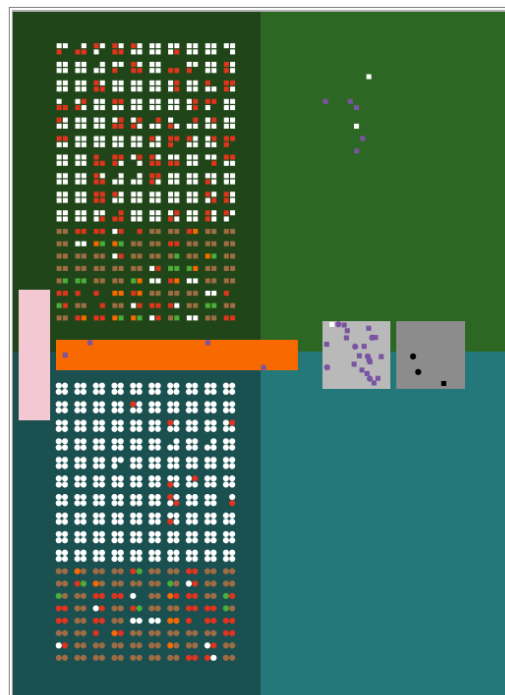


図 1: モデル実行画面例

数、1 日当たりの最大入院者数の最頻値、中央値、最大値を示している。死亡者数の最頻値は 1 名単位、終息日数と最大入院者数の最頻値は 10 日単位と 10 人単位の度数である。これらからも分かるように、100 回の試行結果は、何かしらの特定の統計的分布を示すものではなく、パラメータの変化に伴い、その形状は大きく異なっている。よって、中央値を暫定的な期待値として用い、最大値をそれぞれの対策における最大リスク指標として用いることとする。

死亡者数の中央値は、概ね 3 名から 4 名となっており、どの対策を取っても対策なしと比べて大きな差はないが、分布が同じであることを仮定しない差の検定手法である Brunner-Munzel 検定を行った結果では、複合（テレワーク 20%）、複合（テレワーク 50%）、複合（テレワーク・学級閉鎖 50%）の時に、 $p < 0.05$ あるいは $p < 0.01$ で有意となった。終息日数の中央値では、接触率 8 割減（職場・学校・電車・店舗）、複合（テレワーク 20%）、複合（テレワーク 50%）、複合（テレワーク・学級閉鎖 50%）の時に、 $p < 0.05$ あるいは $p < 0.01$ で有意となった。これらの終息日数の分布は特定の形状を持たずに 40 日付近と 800 日付近に分かれており、荷重平均で評価するのは適切ではない。最大入院者数/日の中央値では、学級閉鎖 100%が $p < 0.05$ 、テレワーク 50%、テレワーク 50%学級閉鎖 50%、時差通勤、テレワーク 50%、接触率 8 割減（職場・学校）、接触率 8 割減（職場・学校・電車）、接触率 8 割減（職場・学

表 2: 対策パラメータ

対策	対策なし	時差通勤	学級閉鎖 50%	学級閉鎖 100%	テレワーク 50%
テレワーク率	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
学級閉鎖率	0.00	0.00	0.50	1.00	0.00
発熱後自宅待機率	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
電車通勤	定時	時差	定時	定時	定時
電車接触率/乗車	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
職場学校接触率/日	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
店舗接触率/訪問	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
病院接触率/通院	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

表 3: 対策パラメータ

対策	テレワーク 50% 学級閉鎖 50%	発熱後自宅待機 100%	時差通勤, テレ ワーク 50%	接触率 8 割減 (電車)	接触率 8 割減 (職場学校)
テレワーク率	0.50	0.00	0.50	0.00	0.00
学級閉鎖率	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
発熱後自宅待機率	0.50	1.00	0.50	0.50	0.50
電車通勤	定時	定時	時差	定時	定時
電車接触率/乗車	0.10	0.10	0.10	0.02	0.10
職場学校接触率/日	0.30	0.30	0.30	0.30	0.06
店舗接触率/訪問	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
病院接触率/通院	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

表 4: 対策パラメータ

対策	接触率 8 割減 (職場学校電車)	接触率 8 割減 (職場学校電車 店舗)	複合 (テレワー ク 20%)	複合 (テレワー ク 50%)	複合 (テレワー ク・学級閉鎖 50%)
テレワーク率	0.00	0.00	0.20	0.50	0.50
学級閉鎖率	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
発熱後自宅待機率	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00
電車通勤	定時	定時	時差	時差	時差
電車接触率/乗車	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
職場学校接触率/日	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
店舗接触率/訪問	0.10	0.02	0.02	0.02	0.02
病院接触率/通院	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

表 5: モデル確率変数

確率変数	パラメータ
初期感染者の属性	一様分布
初期感染者の住居	一様分布
職場内の座席位置	一様分布
学校内の座席位置	一様分布
通勤電車内の乗車位置	一様分布
商業施設内の訪問位置	一様分布
病院内の在室位置	一様分布

校・電車・店舗)、複合(テレワーク 20%), 複合(テレワーク 50%), 複合(テレワーク・学級閉鎖 50%)が $p < 0.01$ で有意となった。一方で、学級閉鎖 50%, 発熱後自宅待機 100%, 接触率 8 割減(電車)の時は有意な差が認められなかった。

また、表の結果をグラフにまとめた図 2, 図 3, 図 4 では、中央値, 最大値, 最頻値でそれぞれの対策の効果を確認できる。これらから、有効な効果が期待できるのは複合対策を取った場合であり、単独の対策や、部分的な対策の組み合わせの場合は、有効な予防策にならないことが分かる。表 9, 表 10, 表 11 に、ベース(対策なし)に対する、それぞれの感染予防策による減少率を示す。

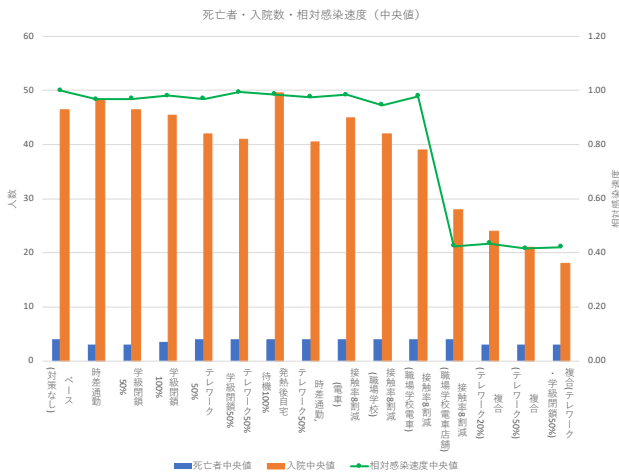


図 2: 死亡者・入院数・相対感染速度(中央値)

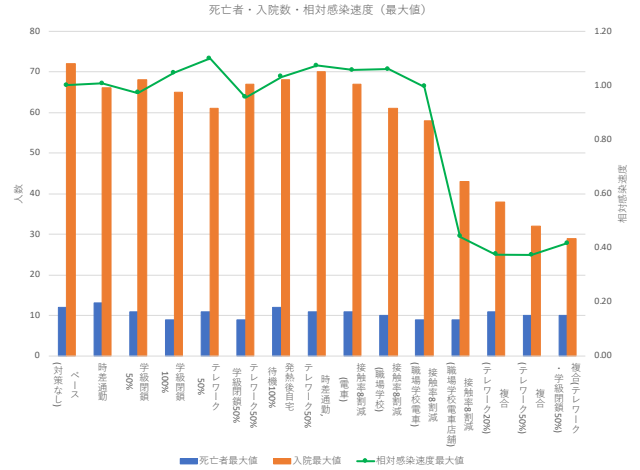


図 3: 死亡者・入院数・相対感染速度(最大値)

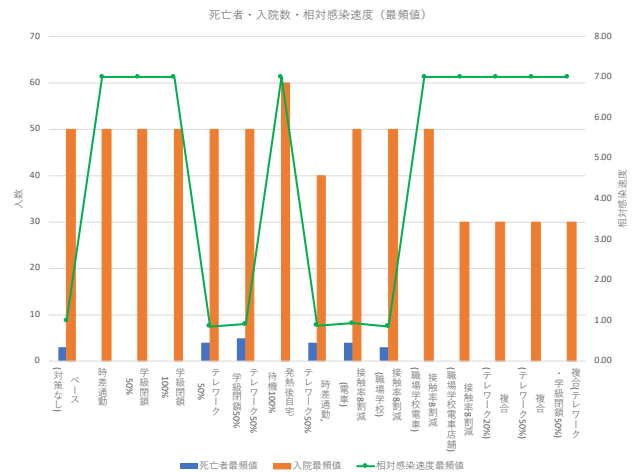


図 4: 死亡者・入院数・相対感染速度(最頻値)

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、複数の感染予防策の有効性について比較検討を行った。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

表 6: シミュレーション結果 1

	対策なし	時差通勤	学級閉鎖 50%	学級閉鎖 100%	テレワーク 50%
死亡者最頻値	3	0	0	0	4
死亡者中央値	4	3	3	4	4
死亡者最大値	12	13	11	9	11
終息日数最頻値	280	40	40	40	330
終息日数中央値	301	311	310	307	310
終息日数最大値	429	426	441	410	390
最大重篤入院者数/日最頻値	50	50	50	50	50
最大重篤入院者数/日中央値	47	49	47	46*	42**
最大重篤入院者数/日最大値	72	66	68	65	61

*p<.05, **p<.01

表 7: シミュレーション結果 2

	テレワーク 50% 学級閉鎖 50%	発熱後自宅待機 100%	時差通勤, テレ ワーク 50%	接触率 8 割減 (電車)	接触率 8 割減 (職場学校)
死亡者数最頻値	5	0	4	4	3
死亡者数中央値	4	4	4	4	4
死亡者数最大値	9	12	11	11	10
終息日数最頻値	310	40	320	300	330
終息日数中央値	303	305	308	306	318
終息日数最大値	449	416	400	406	405
最大重篤入院者数/日最頻値	50	60	40	50	50
最大重篤入院者数/日中央値	41**	50	41**	45	42**
最大重篤入院者数/日最大値	67	68	70	67	61

*p<.05, **p<.01

表 8: シミュレーション結果 3

	接触率 8 割減 (職場学校電車)	接触率 8 割減 (職場学校電車 店舗)	複合 (テレワー ク 20%)	複合 (テレワー ク 50%)	複合 (テレワー ク・学級閉鎖 50%)
死亡者数最頻値	0	0	0	0	0
死亡者数中央値	4	4	3*	3*	3**
死亡者数最大値	9	9	11	10	10
終息日数最頻値	40	40	40	40	40
終息日数中央値	307	709**	692**	722**	714*
終息日数最大値	431	972	1141	1148	1029
最大重篤入院者数/日最頻値	50	30	30	30	30
最大重篤入院者数/日中央値	39**	28**	24**	21**	18**
最大重篤入院者数/日最大値	58	43	38	32	29

*p<.05, **p<.01

表 9: 予防策による低減率 1

	対策なし	時差通勤	学級閉鎖 50%	学 級 閉 鎖 100%	テレワーク 50%
死亡者数低減率 (中央値)	0.0%	25.0%	25.0%	12.5%	0.0%
死亡者数低減率 (最大値)	0.0%	-8.3%	8.3%	25.0%	8.3%
感染速度低減率 (中央値)	0.0%	3.2%	3.1%	2.0%	3.1%
感染速度低減率 (最大値)	0.0%	-0.7%	2.7%	-4.6%	-10.0%
最大重篤入院者/日低減率 (中央値)	0.0%	-4.3%	0.0%	2.2%*	9.9%**
最大重篤入院者/日低減率 (最大値)	0.0%	8.3%	5.6%	9.7%	15.3%

*p<.05, **p<.01

表 10: 予防策による低減率 2

	テレワーク 50%学級閉鎖 50%	発熱後自宅待 機 100%	時差通勤, テ レワーク 50%	接触率 8 割減 (電車)	接触率 8 割減 (職場学校)
死亡者数低減率 (中央値)	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
死亡者数低減率 (最大値)	25.0%	0.0%	8.3%	8.3%	16.7%
感染速度低減率 (中央値)	0.7%	1.5%	2.4%	1.6%	5.4%
感染速度低減率 (最大値)	4.5%	-3.1%	-7.3%	-5.7%	-5.9%
最大重篤入院者/日低減率 (中央値)	11.8%**	-6.5%	12.9%**	3.2%	9.7%**
最大重篤入院者/日低減率 (最大値)	6.9%	5.6%	2.8%	6.9%	15.3%

*p<.05, **p<.01

表 11: 予防策による低減率 3

	接触率 8 割 減 (職場学校 電車)	接触率 8 割 減 (職場学校 電車店舗)	複合 (テレ ワーク 20%)	複合 (テレ ワーク 50%)	複合 (テレ ワーク・学級 閉鎖 50%)
死亡者数低減率 (中央値)	0.0%	0.0%	25.0%*	25.0%*	25.0%**
死亡者数低減率 (最大値)	25.0%	25.0%	8.3%	16.7%	16.7%
感染速度低減率 (中央値)	2.1%	57.6%**	56.6%**	58.4%**	57.9%*
感染速度低減率 (最大値)	0.5%	55.9%	62.4%	62.6%	58.3%
最大重篤入院者/日低減率 (中央値)	16.1%**	39.8%**	48.4%**	54.8%**	61.3%**
最大重篤入院者/日低減率 (最大値)	19.4%	40.3%	47.2%	55.6%	59.7%

*p<.05, **p<.01

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。実験の結果からは、個々の感染予防策（時差通勤、テレワーク、学級閉鎖、接触率低減、発熱後自宅待機）を単独あるいは部分的に複合して実施しても、大きな効果は得ることができないことが判明した。一方で、網羅的な対策を実施した場合は、死亡者数が中央値において最大で25.0%、感染属度が中央値において最大で58.4%、1日当たりの最大の入院者数が最大で61.3%減少することが確認された。新型コロナウイルスの感染は、動的な住民ネットワーク上での接触に伴う相互作用過程であり、その結果は特定の分布にはならないが、さまざまな予防策を複合的に講じることで、感染拡大の最大リスクを減少させる可能性が推定された。これらから、最大入院患者数を減少させることは、医療崩壊を回避し、死亡者数を減少させることにつながると考えられる。

本報告では、感染予防策について比較検討を試みた。しかし、中国からの報告によれば、死亡率は年齢によって大きく異なっている。そして、入院が必要な重篤者の急増が、適切な医療を施すことができずに死亡者数を増加させている。また、さまざまなイベントの取りやめが報告されてきている。これらに対する検討は今後の課題である。

rev.1 表9, 表10, 表11の「最大入院者数/日」の表記を、正確さのために「最大重篤入院者数/日」に改訂した。また、同表の検定結果も追記した。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 厚生労働省: 新型コロナウイルス感染症の現在の状況と厚生労働省の対応について, https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_09690.html, 2020.2.21, (2020)
- [3] 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_iryuu/dengue_fever_qa_00001.html#Q8, 2020.2.23 (2020)
- [4] NTT データ: <https://www.nttdata.com/jp/ja/news/information/2020/021400/>, 2020.02.14 (2020)
- [5] 日本経済新聞: <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO55701430W0A210C2MM8000/>, 2020.02.16 (2020)
- [6] 宮城県: <https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/chukisi/bcp-corona.html>, 2020.02.17 (2020)
- [7] Li, D., Liu, Z., Liu, Q., Gao, Z., Zhu, J., Yang, J., Wang, Q.: Estimating the Efficacy of Traffic Blockage and Quarantine for the Epidemic Caused by 2019-nCoV (COVID-19), medRxiv, preprint, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.02.14.20022913> (2020)
- [8] Burke, D.S., Epstein, J.M., Cummings, A.T., Parker, J.I., Cline, K.C., Singa, R.M., Chakravarty, S.: Individual-based Computational Modeling of Smallpox Epidemic Control Strategies, the Society for Academic Emergency Medicine, 13(11), 1142-1149 (2006)
- [9] Epstein, J. M.: Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling, Princeton University Press (2007)
- [10] 大日康史: Individual based mode を用いての公衆衛生的対応能力を明示的に考慮した天然痘対策の評価, 医療と社会, 16(3), 275-284 (2007)
- [11] Liu, F, Enanoria, W. T. A., Zipprich, J., Blumber, S., Harriman, K., Ackley, S. F., Wheaton, W. D., Allpress, J. L., Porco, T. C.: The role of vaccination coverage, individual behaviors, and the public health response in the control of measles epidemics: an agent-based simulation for California, BMC Public Health, 15:447 (2015)
- [12] Hunter, E, Namee, B. M., Kelleher, J.: An open-data-driven agent-based model to simulate infectious disease outbreaks, PLOS ONE 14(1): e0211245. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211245> (2019)
- [13] WHO: Ebola virus disease, <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ebola-virus-disease> WHO Fact sheets, (2020)
- [14] 倉橋節也, "エボラ出血熱に対するエージェントベース医療政策ゲーミング&シミュレーション", 日本シミュレーション&ゲーミング学会誌, 26(2), 52-63 (2017)

- [15] Setsuya Kurahashi: "An Agent-Based Infectious Disease Model of Rubella Outbreaks", International Conference on Agents and Multi-agent Systems: Technologies and Applications 2019, ams19-037 (2019)
- [16] Rothe, D., et al.: Transmission of 2019-nCoV Infection from an Asymptomatic Contact in Germany, The new England journal of medicine, DOI: 10.1056/NEJMc2001468 (2020)
- [17] 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)