

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 rev.2 -

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 severe hospitalised patients per day were decreased significantly at the median and maximum respectively. Regarding the effect on event holding, the experiment showed that even large-scale events as well as small-scale events in which about 50 to 100 people participate, especially events with a high frequency of excursions in the venue are particularly high risk.

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、2月には31の省で感染が確認され、急速な勢いで中国全土に感染が拡大した [1]。同時に、世界各国へも感染が広がりつつあり、2020年3月初旬には4000名を超える死亡者と110を超える国と地域で感染者が確認され、WHOがパンデミックを宣言する事態となった。日本でも、国内で約600名、クルーズ船で約700名の陽性が確認されている [4]。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 [5]、テレワークや時差出勤 [6]、外出や対面の会議を避ける [7] 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 [8]。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¹。

*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. 2: China CDC, WHO-China の報告に基づきモデルを改訂し再実験を行なった。また、イベント開催の影響に関する実験結果 (6章) を追加した。

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[9][10]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[11]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[12][13]。

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[14]。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あり、感染者への1メートル以内での感染リスクは高い。倉橋[15]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[16]。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ことが推察され、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[17]、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[15]および風疹モデル[16]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大家族と、大人だけの二大家族が住んでいる。子供のいる四大家族は100世帯あり、2人の親と2人の子供によって構成される。大人だけの二大家族は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[18]。二大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。

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

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][19]。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。

このモデルに対して、27 種類の感染予防策を策定した。それぞれの効果を予測するために、(1) : 対策なし、(2) ~ (11) : 基本予防策の効果、(12) ~ (22) : 基本予防策の複合効果、(24) ~ (27) : 接触率低減策と基本予防策の複合効果、の 4 カテゴリーに分けて実験を行うこととした。

1. ベースモデル：感染予防策を講じない
2. 時差通勤：電車通勤者は 2 回に分かれて通勤する
3. 学校閉鎖：それぞれの町の学校で子供たちの通学数を 0 にする
4. テレワーク.50：それぞれの町で親の通勤者数を 1/2 にする
5. 発熱後自宅待機.75：発熱後病院で診察を受け、翌日から自宅待機する率を 0.75（通常の 2 倍）にする
6. 外出半減 0.25/日：通常 0.5/日毎の食事買物などの外出を 1/2 する
7. 接触低減（電車）：咳エチケットや手洗、混雑の回避などで通勤途中の電車内接触率を 1/2 にする
8. 接触低減（職場、学校）：咳エチケットや手洗などで職場や学校での接触率を 1/2 にする
9. 接触低減（店舗）：咳エチケットや手洗、混雑の回避などで、店舗やショッピングモールなどでの接触率を 1/2 にする
10. 接触低減（自宅）：咳エチケットや手洗、個別タオルなどで、自宅での接触率を 1/2 にする
11. 全接触低減：全ての接触率（職場、学校、電車、店舗、自宅）を 1/2 にする
12. 複合予防策：複合予防策として時差通勤・テレワーク 50%・学校閉鎖を行う
13. 複合予防策, 外出.45：複合予防策に加えて、外出頻度を 0.45/日にする
14. 複合予防策, 外出.40：複合予防策に加えて、外出頻度を 0.40/日にする
15. 複合予防策, 外出.35：複合予防策に加えて、外出頻度を 0.35/日にする
16. 複合予防策, 外出.30：複合予防策に加えて、外出頻度を 0.30/日にする
17. 複合予防策, 外出.25：複合予防策に加えて、外出頻度を 0.25/日（通常の 1/2）にする
18. 複合予防策, 自宅.60：複合予防策に加えて、発熱後自宅待機率を 0.60 にする
19. 複合予防策, 自宅.70：複合予防策に加えて、発熱後自宅待機率を 0.70 にする
20. 複合予防策, 自宅.80：複合予防策に加えて、発熱後自宅待機率を 0.80 にする
21. 複合予防策, 自宅.90：複合予防策に加えて、発熱後自宅待機率を 0.90 にする
22. 複合予防策, 自宅 1.0：複合予防策に加えて、発熱後自宅待機率を 1.00 にする
23. 接触低減策, 自宅.75：全接触低減に加えて、発熱後自宅待機率を 0.75（通常の 2 倍）にする
24. 接触低減策, 学校閉鎖：全接触低減に加えて、学校閉鎖を行う
25. 接触低減策, 時差テレ：全接触低減に加えて、時差通勤とテレワーク 50%を行う
26. 接触低減策, 時差テレ学校閉鎖：全接触低減に加えて、時差通勤、テレワーク 50%、学校閉鎖を行う
27. 接触低減策, 外出.25：全接触低減に加えて、外出頻度を 0.25/日（通常の 1/2）にする

ただし、複合予防策：時差通勤・テレワーク 50%・学校閉鎖・接触低減策；全ての接触率（職場，学校，電車，店舗，自宅）を 1/2 とした．表 2 に，それぞれの対策の設定パラメータを示す．

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．

5 予防策シミュレーション実施結果

表 1 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，終息日数，1 日当たりの最大重度入院者数の中央値，最大値を示している．100 回の試行結果を見ると，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た．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 8 名以下となっており，どの対策を取っても対策なしと比べて大きな差はない．感染速度を表す終息日数の中央値では，複合予防策を講じた時に大きく増加している．1 日あたりの最大の重度入院者数中央値では，複合予防策や接触低減策による減少効果もはっきりと見られる．単体の予防策の中では，(6) 外出半減，(11) 全接触半減で減少が目立っている．そこで，この 2 つの予防策の効果を調べるために，複合予防策（時差通勤・テレワーク 50%・学校閉鎖）に加えて，それぞれの予防策の効果を調べたのが，(12)～(17) の店舗などへの外出頻度減少と，(18)～(22) の発熱後自宅待機率である．その結果，どちらも大きな効果が見られ，複合予防策に加えて店舗等への外出頻度を普段の半分以下にした場合に，重度入院者数と死亡者数をほぼ 0 にすることに成功している．また，発熱後の自宅待機率を 0.9 以上にした (21) の場合も同様である．

これらのデータ分布は正規分布のような特定の分布形状を持たないため，荷重平均で評価するのは適切ではない．そこで，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 test および Bonferroni 補正による検定を行った．重度入院者数/日の結果は，学校閉鎖，テレワーク 50%，発熱後自宅待機率 75%，

接触率削減（電車）を除いて，ベース（対策なし）と比較において， $p < 0.000037$ ($p < 0.01$ を Bonferroni 補正) で有意となった．一方で，差は有意ではあるものの，単体の予防策だけでは大きな効果が見られず，複合予防策に加えて店舗等の外出頻度減少と発熱後自宅待機率の増加の二つが，大きな効果をもたらすことが明らかとなった．

表の結果をグラフにまとめた図 1，図 2 では，中央値，最大値でそれぞれの対策の効果を示した．図から，有効な効果が期待できるのはテレワークや学校閉鎖，外出抑制などを組み合わせた複合予防策を取った場合であり，単体の対策や，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確認できる．一方，学校閉鎖のような社会的な影響が強い政策以外でも，全接触低減策に発熱後自宅待機の強化対策を組み合わせた (23) の複合策，時差通勤とテレワークを組み合わせた (25) の複合策でも，十分に効果的な予防が可能であることを示唆している．

6 イベント開催による感染拡大の影響推定

政府や自治体，によって，感染クラスターの発生が危惧されるイベントの自粛が求められている．新型コロナウイルス感染症対策専門家会議では，次の 3 つの条件，1) 換気が悪い密閉空間，2) 人が密集している，3) 近距離での会話や発声，が感染のリスクが高いとして指摘している [20]．一方で，小規模なライブハウスのようなイベントや，スポーツ観戦などの大規模イベント，あるいは展示会などの規模がさまざまなイベントの影響については，そのリスクは明示されていない．そこで，イベントの種類によってどのような感染拡大リスクがあるのかについて，次のような条件で実験を行った．ここでは全ての実験の前提として，複合予防策（時差通勤，テレワーク 50%，学校閉鎖）が既に実施されているものとした．

e1:複合 S10% 複合予防策実施時に，50 席規模の会場で 100 人程度が集まる密集したイベントを開催（密度 2.0）

e1:複合 S10% 複合予防策実施時に，50 席規模の会場で 100 人程度が集まる密集したイベントを開催（密度 2.0）

e2:複合 M10% 複合予防策実施時に，100 席規模の会場で 100 人程度が集まるイベントを開催（密度 1.0）

表 1: 予防策シミュレーション結果

		1:ベース (対策なし)	2:時差通勤	3:学校閉鎖	4:テレワーク ク.50	5:発熱後自 宅.75	6:店舗等外 出.25	7:接触低減 (電車)	8:接触低減 (職場学校)	9:接触低減 (店舗)	10:接触低 減(自宅)
死亡者数	中央値	3	2	3	3	2**	1**	3	3	2*	3
	最大値	9	8	9	8	7	4	7	8	7	7
終息日数	中央値	137.5	146*	144	140	147.5	154.5*	137.5	151.5**	151.5**	146.5
	最大値	175	196	201	178	208	200	179	185	195	244
重度入院数/日	中央値	130	121.5**	125	133	99**	51**	130.5	122.5**	86**	112.5**
	最大値	158	145	147	152	130	82	162	154	110	144
若年重度入院数/日	中央値	7	6	6	6	6	4**	5	6	5**	5*
	最大値	14	13	12	13	11	13	13	11	13	11
成年重度入院数/日	中央値	21	19	20	21	16.5**	15**	21.5	19	19	18**
	最大値	35	29	29	32	27	26	33	28	29	28
高齢重度入院数/日	中央値	106	98**	103	107	79**	35**	106.5	100**	66**	93**
	最大値	135	123	124	132	102	55	137	130	83	119
		11:全接触 低減	12:複合予 防策	13:複合策, 店舗等.45	14:複合策, 店舗等.40	15:複合策, 店舗等.35	16:複合策, 店舗等.30	17:複合策, 店舗等.25	18:複合策, 店舗等.60	19:複合策, 店舗等.70	20:複合策, 店舗等.80
死亡者数	中央値	1**	2	2	2**	1**	0**	0**	2	2	1**
	最大値	5	9	8	7	6	6	3	8	8	7
終息日数	中央値	199	160**	181**	199**	208**	227.5	105.5	171.5**	178**	185
	最大値	334	237	266	293	345	410	512	238	255	309
重度入院数/日	中央値	45.5**	103**	87**	66**	43.5**	23**	2**	89**	70.5**	51**
	最大値	71	133	108	93	73	49	29	119	108	81
若年重度入院数/日	中央値	3**	5**	5**	3**	3**	1**	0**	4**	4**	3**
	最大値	9	12	10	9	8	6	6	10	9	8
成年重度入院数/日	中央値	10**	15**	15**	12**	9**	6**	0.5**	14**	12**	9**
	最大値	19	29	26	22	18	19	13	27	24	19
高齢重度入院数/日	中央値	33.5**	82.5**	70.5**	51**	32.5**	17**	1.5**	71**	56**	38.5**
	最大値	54	112	91	75	60	36	22	102	87	69
		21:複合策, 自宅.90	22:複合策, 自宅1.0	23:接触減, 自宅.75	24:接触減, 学校閉鎖	25:接触減, 時差テレ	26:接触減, 時差テレ学 校	27:接触減, 店舗等.25			
死亡者数	中央値	0**	0**	0**	1**	0**	0**	0**			
	最大値	6	4	4	7	7	5	2			
終息日数	中央値	85	59.5**	179.5	243.5	80.5	72	49			
	最大値	350	392	403	353	596	508	524			
重度入院数/日	中央値	2.5**	1**	9.5**	36**	3**	2**	1**			
	最大値	67	34	35	63	45	43	17			
若年重度入院数/日	中央値	0**	0**	1**	2**	0**	0**	0**			
	最大値	7	4	6	9	6	5	6			
成年重度入院数/日	中央値	1**	0**	3**	8**	1**	0.5**	0**			
	最大値	14	8	14	18	13	11	9			
高齢重度入院数/日	中央値	2**	1**	7**	26**	3**	2**	1**			
	最大値	52	29	28	51	34	30	11			

Bonferroni 補正 *p<.00019 **p<.000037

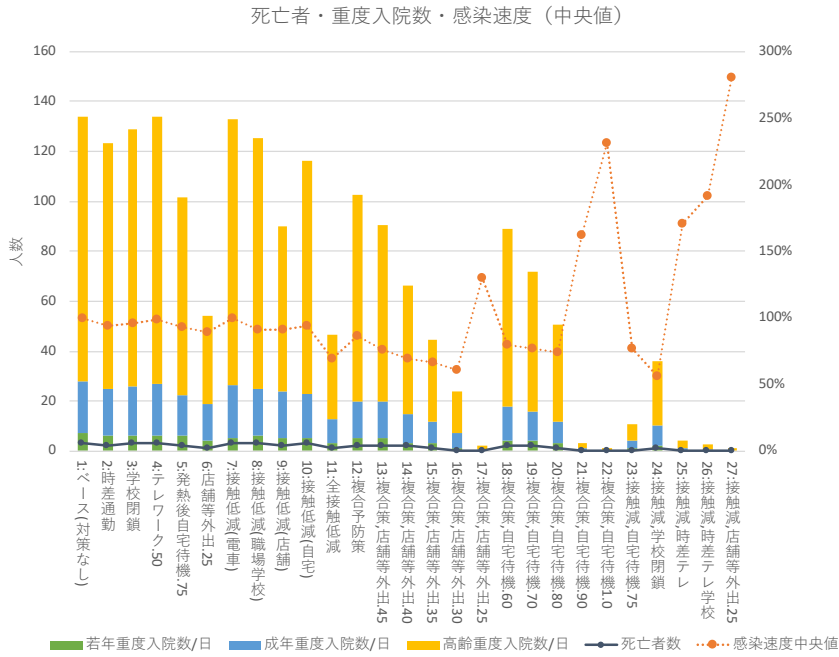


図 1: 死亡者・重度入院者数/日・相対感染速度（中央値）

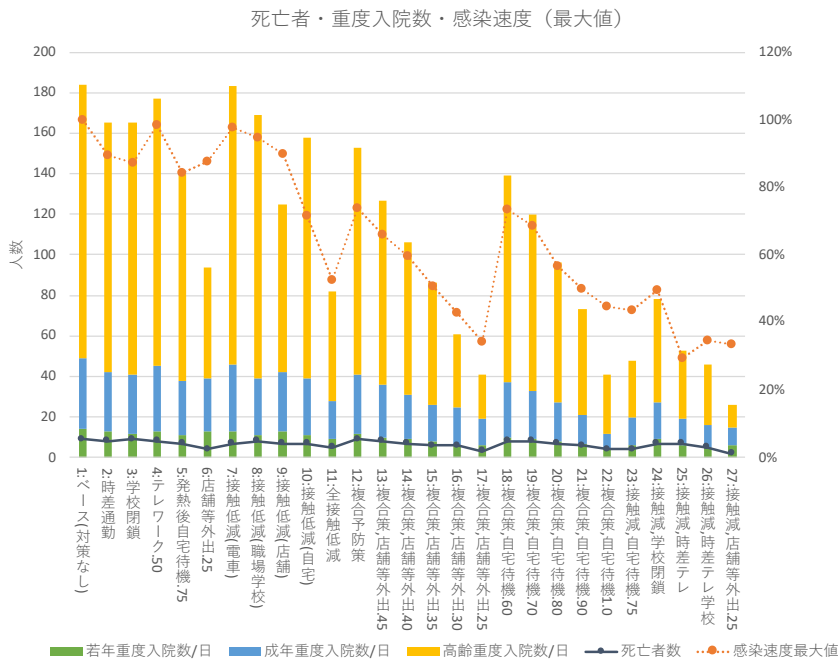


図 2: 死亡者・重度入院者数/日・相対感染速度（最大値）

表3に、それぞれの対策の設定パラメータを示す。イベント開催による死亡者・重度入院者数/日・相対感染速度の影響比較のシミュレーション実験結果を図3、図4に示す。

e1~e5では、イベントに集まる人数を一定とした場合の会場規模の違い(会場密度)を比較している、これによると、どのイベント会場の大きさであっても、複合予防策との差は重度入院者数において差が認められた。しかし、会場が小さいほど重度入院者数(黄:高齢、青:成年、緑:若年)および軽度入院者数(マゼンタ)は若干増加しているように見えるが、Brunner-Munzel test および Bonferroni 補正による検定結果で、e1~e5間で差は認められなかった、

e6~e30では、訪れる人が会場内を複数回移動(回遊)し、多数の人と接触する事による影響を比較している。e6~e10では50人規模の小規模会場、e11~e15では100人規模の中規模会場、e16~e30は150人から300人の大規模会場を想定している、どの会場規模であっても、回遊数が増えるにつれて、高齢者の重度入院者数が増加している。特に、回遊数5の300人規模の大規模会場では、1日当たりの重度入院者数の中央値が1.61倍になり、軽度入院者数においては1.71倍に達している。これは高齢者のみならず若年者や成年者においても、同様に傾向を示している。感染速度においても1.27倍となっており、感染の早さが促進されていることがわかる。

7 議論

どのようなメカニズムでそれぞれの予防策の効果が現れるのかを検討する。(2)~(5)までの単独の予防策(時差通勤、学校閉鎖、テレワーク、発熱後自宅待機強化)では、大きな効果が見られなかった。また、より一般的な対策である接触低減策(電車、職場、学校、店舗、自宅)を個別に実施した(7)~(10)の場合も、大きな効果は見られなかった。一方で、全ての接触低減策を組み合わせた(11)の場合では、死亡者数、重度入院者数とも6割程度減少している。このことから、予防策の実施される場所や時間に「抜け」が一つでもあった場合は、感染リスクが高いままであることが推定される。

また、(6)店舗等への外出抑制策が単独でも一定程度効果が見られたことから、他の予防策と組み合わせた(13)~(17)において、率を変化させて効果を確認した。その結果、(12)の複合予防策(時差通勤、テレワーク、学校閉鎖)だけでは効果が限定的であったのに対して、外出頻度低減策を組み合わせた場合に、大きな効果を見せた。これは、(12)の予防策ではカバーされていない店舗等において感染が発生していることを示

唆している。特に店舗へは、親や子供に加えて高齢者も定期的に訪れており、感染クラスターが発生するリスクが高い場所と考えられる。重度入院者数の世代別の数値(??~??)を見ると、若年世代や成年世代に比べて、高齢世代の人数はどの場合においても数倍高くなっている。店舗などの全世代が頻繁に訪れる場所で高齢者が感染した場合に、重度入院者や死亡者が増加しているものと思われる。また、効果的な予防策の場合は、相対的な感染速度(ベース終息日数/予防策終息日数)も減少しており、重篤患者への適切な医療に加えて濃厚接触者の追跡も容易になる。このことから、高齢者への感染を如何に防ぐかが、全体の重度入院者や死亡者を減らすことにつながるものと考えられる。

一方で、(5)において効果の見られなかった発熱後自宅待機率増加が、(18)~(21)の複合予防策+発熱後自宅待機率増加では顕著な効果が見られた。これは、感染力のある患者を自宅に待機させるだけでは、家庭内感染が発生し、家族から外へと感染が広がることを示唆している、WHOと中国の共同レポートで指摘された、家庭内での感染クラスターの発生比率が最も高かったことと一致している。それを防ぐためには、時差通勤、テレワーク、学校閉鎖、外出抑制などの対策と組み合わせることが極めて重要であることを示している。現状では、PCR検査数や検査確定までの時間制約から、感染が疑われる発熱者でもすぐに入院させることはできず、一定期間自宅に待機せざるを得ないため、これらの複合策が必須となる(なお、(17)や(21)以降の複合策で感染速度の中央値が増加しているのは、感染がすぐに終息してしまうケースが頻繁に発生するようになった事による。)

イベント開催の影響については、小規模なイベントであっても、1日当たりの重度入院者数に有意な影響を与えることが確認された。しかし、イベント会場の広さの違いは感染拡大にほとんど影響を与えないが、参加者数の規模や会場内での参加者の回遊頻度が大きな影響を与えることが推定された。イベント会場などでの多人数間での頻繁な接触が、感染リスクを増加させることは十分に予想されたことではあるが、大規模なイベントはもとより、50~100人程度が参加するような小規模イベントであっても、会場内の回遊頻度が高い種類のイベントは、特にリスクが高いことが示された。また、重度入院者数の増加に止まらず、病院施設での軽度入院者数(隔離)が大幅に増加することから、医療崩壊の危険性も示唆された。

8 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、一般の市民や企

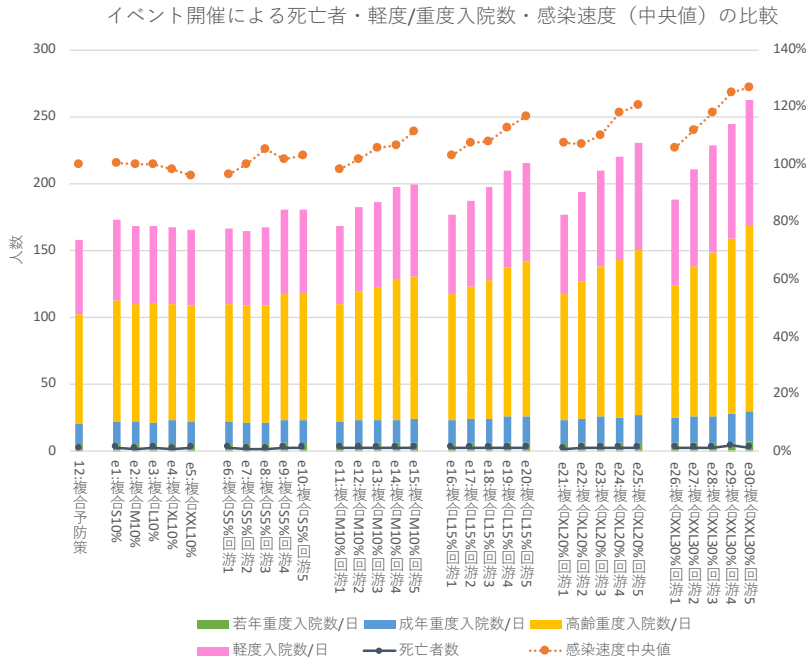


図 3: イベント開催による死亡者・軽度/重度入院者数/日・相対感染速度（中央値）の影響比較

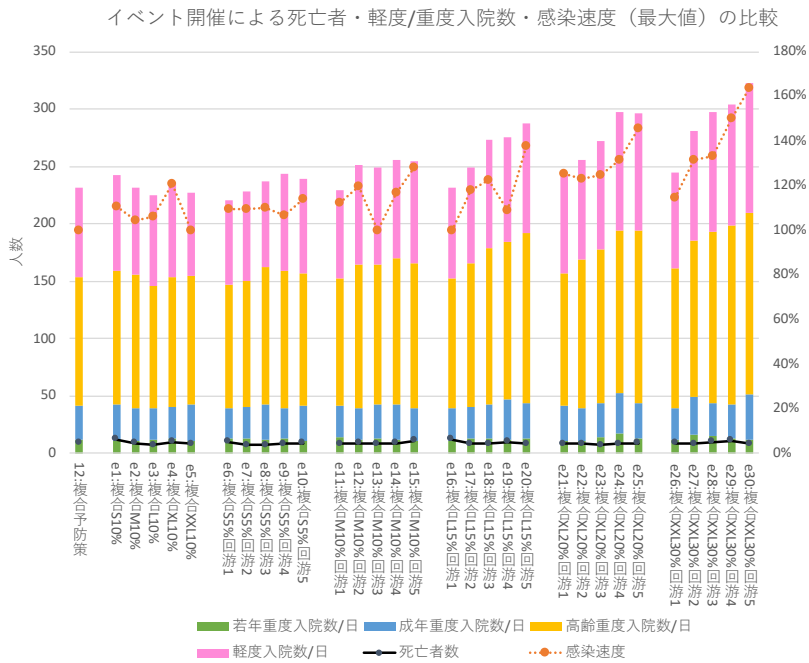


図 4: イベント開催による死亡者・軽度/重度入院者数/日・相対感染速度（最大値）の影響比較

業、学校などにおいて対策が可能な予防策の有効性についての比較検討を行った。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、複合的な対策を実施した場合は、死亡者数や1日当たりの最大の重度入院者数を大きく減少でき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、それぞれの感染事象は特定の分布を示さない。これは、たまたま確認された事例から予防策の効果を推定することの限界を示している。本研究では、100回の試行実験を通して各種予防策の最大リスクを評価することで、予防策を複合的に講じることが、感染拡大の最大リスクを減少させる可能性を示した。重度の入院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。また、イベント開催に影響について、大規模なイベントはもとより、50~100人程度が参加するような小規模イベントであっても、会場内の回遊頻度が高い種類のイベントは、特にリスクが高いことを示した。

本報告では、感染予防策について比較検討を試みた。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。日々新しい報告が届いており、2020年3月初旬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。中国での最新の分析から、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しまったことが報告されている。しかし、病床数の急増やPCR検査および濃厚接触者の追跡体制の増強によって、急速に死亡率を減少させている。本報告では、これらの医療対策の効果については言及することができなかった。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が、その効果についても検証が必要である。これらに対する検討は今後の課題である。

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] 厚生労働省: 新型コロナウイルス感染症の現在の状況について, https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_10032.html, 2020.3.8 (2020)
- [5] NTT データ: <https://www.nttdata.com/jp/ja/news/information/2020/021400/>, 2020.02.14 (2020)
- [6] 日本経済新聞: <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO55701430W0A210C2MM8000/>, 2020.02.16 (2020)
- [7] 宮城県: <https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/chukisi/bcp-corona.html>, 2020.02.17 (2020)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] Epstein, J. M.: Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling, Princeton University Press (2007)
- [11] 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)
- [12] 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)

A モデルパラメータ

- [13] 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)
- [14] WHO: Ebola virus disease, <https://www.who.int/en/news-room/factsheets/detail/ebola-virus-disease> WHO Fact sheets, (2020)
- [15] 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)
- [16] 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)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] WHO-China: Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19), WHO-ChinaJointMissionMembers, <https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/who-china-joint-mission-on-covid-19-final-report.pdf>,(2020)
- [20] 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)

表 2: 対策パラメータ

対策	1:ベース (対策なし)	2:時差通勤	3:学校閉鎖	4:テレワーク.50	5:発熱後自宅.75	6:外出半減.25	7:接触低減 (電車)	8:接触低減 (職場学校)	9:接触低減 (店舗)	10:接触低減 (自宅)
テレワーク	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
学校閉鎖	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
発熱後自宅待機	0.50	0.50	0.50	0.50	0.75	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
時差通勤	-	時差	-	-	-	-	-	-	-	-
店舗等外出/日	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.25	0.50	0.50	0.50	0.50
電車接触率	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.04	0.07	0.07	0.07
職場学校接触率	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.07	0.13	0.13
店舗接触率	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.04	0.07
自宅接触率	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.21
対策	11:全接触低減	12:複合予防策	13:複合予防策, 外出.45	14:複合予防策, 外出.40	15:複合予防策, 外出.35	16:複合予防策, 外出.30	17:複合予防策, 外出.25	18:複合予防策, 自宅.60	19:複合予防策, 自宅.70	20:複合予防策, 自宅.80
テレワーク	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
学校閉鎖	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
発熱後自宅待機	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.70	0.80
時差通勤	-	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差
店舗等外出/日	0.50	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.50	0.50	0.50
電車接触率	0.04	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
職場学校接触率	0.07	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
店舗接触率	0.04	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
自宅接触率	0.21	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
対策	21:複合予防策, 自宅.90	22:複合予防策, 自宅.1	23:接触減, 自宅.75	24:接触減, 学校閉鎖	25:接触減, 時差テレ	26:接触減, 時差テレ学閉	27:接触減, 外出.25			
テレワーク	0.50	0.50	0.00	0.00	0.50	0.50	0.00			
学校閉鎖	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00			
発熱後自宅待機	0.90	1.00	0.75	0.50	0.50	0.50	0.50			
時差通勤	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差			
店舗等外出/日	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50			
電車接触率	0.07	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04			
職場学校接触率	0.13	0.13	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07			
店舗接触率	0.07	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04			
自宅接触率	0.41	0.41	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21			

テレ: テレワーク

表 3: イベント開催パラメータ

対策	12:複合予防策	e1:複合S10%	e2:複合M10%	合	e3:複合L10%	e4:複合XL10%	合	e5:複合XXL10%	合	e6:複合S5% 回遊 1	e7:複合S5% 回遊 2	e8:複合S5% 回遊 3	e9:複合S5% 回遊 4	e10:複合S5% 回遊 5		
テレワーク	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50		
学校閉鎖	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
発熱後自宅待機	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50		
時差通勤	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差		
店舗等外出/日	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50		
電車接触率	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07		
職場学校接触率	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13		
店舗接触率	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07		
自宅接触率	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41		
EV 接触率	-	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10		
EV 会場広さ	-	M	M	L	XL	XXL	S	S	S	S	S	S	S	S		
EV 参加者%	-	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05		
EV 回遊回数	-	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	4	5	5		
対策	e11:複合M10% 回遊 1	e12:複合M10% 回遊 2	e13:複合M10% 回遊 3	合	e14:複合M10% 回遊 4	e15:複合M10% 回遊 5	合	e16:複合L15% 回遊 1	合	e17:複合L15% 回遊 2	合	e18:複合L15% 回遊 3	合	e19:複合L15% 回遊 4	合	e20:複合L15% 回遊 5
テレワーク	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
学校閉鎖	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
発熱後自宅待機	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
時差通勤	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差	時差
店舗等外出/日	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
電車接触率	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
職場学校接触率	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
店舗接触率	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
自宅接触率	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
EV 接触率	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
EV 会場広さ	M	M	M	M	M	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L
EV 参加者%	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
EV 回遊回数	1	2	3	4	5	5	1	2	2	3	4	5	5	5	5	5