

避難所生活における感染症蔓延シミュレーション

○濱田咲紀 松井陽太郎 嶋直紀 市川学 (芝浦工業大学)

infection spreading simulation model in shelter

* S. Hamada M. Ichikawa Y. Matsui N. Shima (Shibaura Institute of Technology)

概要— これまでの感染症シミュレーションにおいては都市や地域単位の流行を表現するが多かったが、先行研究では住宅、学校の教室、オフィスという局所的な空間におけるシミュレーションを行い、感染リスクや有効な対策を示した。現在、感染症蔓延下における災害発生時の対応について多く議論がなされている。特に避難所は衛生環境や多人数の共同生活により感染症蔓延のリスクが非常に高い。感染対策の啓蒙ポスターやパーティションの設置など様々な対策が行われているものの、対策の効果については定量的に示されていない。本研究では、避難所における感染対策を行った場合の感染状況を再現し結果を得ることで避難所における感染リスクと有効な対策方法を示す。

キーワード: 感染シミュレーション, 避難所, エージェントベースモデル

1. 研究の背景と目的

1.1. 研究背景

近年、インフルエンザや風邪に加え SARS, MARS, 新型コロナウイルスなど新興感染症が次々と流行している。特に新型コロナウイルス感染症は 2020 年にパンデミックを起こし、世界各地でロックダウンや渡航制限が行われるような混乱状態となった¹⁾。日本では 2020 年 12 月現在も連日感染者数のニュースが流れ、マスク着用の推奨、こまめな消毒や換気、外出自粛など様々な対策が行われている。しかし、流行当初にマスクの効果について懐疑的な声が上がったり、個人々の危機感の差から意見の不一致が起きたりしている。この原因は、どのような対策をすれば感染しないのか、どのくらいの人が対策をすれば感染者数減少の効果が得られるのかが定量的に示されていないことにある²⁾。

今回の新型コロナウイルス感染症のパンデミックをうけてスーパーコンピュータ富岳を用いた物理演算シミュレーションが行われ、その結果が多数報告されている。複数種類の飛沫防止策の効果を検証した結果、不織布マスクは吸い込む飛沫を 70%, 吐き出す飛沫を 80%削減することが分かった。不織布マスクと比較してウレタンマスクと布マスクは効果が薄れ、フェイスガードとマウスガードは飛沫の正面への飛散を防止する事以外はほとんど効果がないことが分かった。また、飛沫が飛散するリスクは咳よりも会話の方が高く、4 人掛けのテーブルでは隣席が正面の席よりも 5 倍リスクがあることが示された³⁾。これらの知見を参考に個人や店舗が対策を行っており、感染症を正しく防ぐためにはシミュレーションが有用であることが分かる。しかし、上記の物理演算は非常に小さな規模でのシミュレーションであり、ニュースで流れるような感染者数を算出するような規模、つまり出勤や通学など人々の社会生活によって感染が拡大していく様子を再現するには至っていない。感染拡大の様子を予測する方法として数理モデルが多く用いられている⁴⁾。数理モデルとは人口集団を感受性者、感染者、回復者に大きく分類しそれぞれの人数を常微分方程式系で表現するものである。数理モデルが感染者数の予測に有効である一方、人々の移動や感染対策が発生する実際の社会でどのように感染者が増えていくのかを知りたい場合

は エージェントベースシミュレーションが適切である。エージェントベースシミュレーションとは、定義された環境の中でエージェントが意思決定に従い行動する社会モデリングの手法である。これまでの感染症のエージェントベースシミュレーションは都市や地域単位の規模が多かった⁵⁾。この規模のシミュレーションでは人の移動を重視しており、移動先の住宅や学校、職場などの局所的空間の感染率は数式で計算を行うのみで深く考慮されていない。この点に注目して先行研究では住宅、学校の教室、オフィスという局所的な空間におけるシミュレーションを行い、局所的空間におけるシミュレーションの有効性や、空間が異なると感染リスクも異なることを示した⁶⁾⁷⁾。

また現在、新型コロナウイルス感染症蔓延下における災害発生時の対応について多く議論がなされている⁸⁾。特に避難所は災害発生後に物資やインフラが不十分な状況で人々が集まるために衛生環境が悪く、感染症が発生しやすい。また、多人数の共同生活により感染症蔓延のリスクが非常に高い。東日本大震災時に開設された避難所でインフルエンザのアウトブレイクが発生した事例も存在する⁹⁾。度重なる災害の中、感染対策の啓蒙ポスターやパーティションの設置など様々な対策が行われているものの、対策の効果については定量的に示されていない。

新型コロナウイルス感染症流行下でも災害は発生する可能性があり、実際に令和 2 年 7 月豪雨では避難所が開設された。この際、多くの避難所で感染症対策の対応が間に合わず、事前準備や訓練の必要性が問われた。平時から防災と感染対策の両方を考慮して準備し、災害発生時には感染症対策を徹底した避難所運営がなされなければならない¹⁰⁾。

1.2. 研究目的

本研究では、避難所で感染症が発生した際の感染リスクと行うべき感染対策をエージェントベースの感染症モデルを用いて明確にする。研究概要図は Fig. 1 に示した通りである。感染症の対策別シナリオを想定してシミュレーションを行い、その結果を分析することで避難所の備蓄物資や運営方針の見直しの指標となることを目指す。

2. 先行研究

倉橋⁹⁾は隣接する2つの町で人々が生活する想定のエージェントベースシミュレーションを行い、感染症対策を評価した。シミュレータ内で学校や職場などの施設を作り、それぞれの感染確率を人の接触率で表現した。施設間の人の移動をエージェントベースモデルで表現したが、各施設内で人の行動は再現されていないため、施設内の感染再現の精度に疑問が残る。よって、局所的な空間でシミュレーションを行う必要があると考えた。

局所的空間の感染シミュレーションを行った研究として2つ説明する。下馬場⁹⁾は、個人が感染対策を行った場合の仮想オフィスにおける感染拡大抑制の効果を検証した。その結果、新型インフルエンザ発生時の咳エチケットと対人距離の保持の為に人数減少によって生じる感染者数には、一定の閾値が存在する可能性が示された。市川ら⁷⁾は仮想生活空間として家庭と教育機関を選択し、感染者の咳を受けた回数によって感染リスクを表現した。この研究は空間が異なると感染リスクも異なることを示した。これらの研究により、局所的空間での感染シミュレーションが感染対策の評価に有効であると考えられる。しかし、これらの先行研究は平常時の空間であり、発災など非常時の感染シミュレーションの事例は存在しなかった。よって、本研究では非常時に発生する空間の避難所に着目した。

3. 感染モデルの構築

本研究では汎用シミュレーションパッケージ S⁴ Simulation System を使用して感染モデルを構築する。本研究の流れは Fig. 2 に示した通りである。モデルを構築する際に考慮する概念は感染プロセス、行動プロセス、空間の再現の3つに分類される。空間の再現とは、3D モデル作成ツールを用いて局所的空間を製作することである。感染プロセスとは感染者から未感染者へ感染が拡大していく過程の事である。多くの感染症で見られる飛沫感染、空気感染、接触感染のうち飛沫感染を考慮する。行動プロセスとはシミュレーション実行時の人々の行動を指す。これにより人々はランダムに動き回るだけでなく、シミュレーションを行う空間に即した行動を取る。

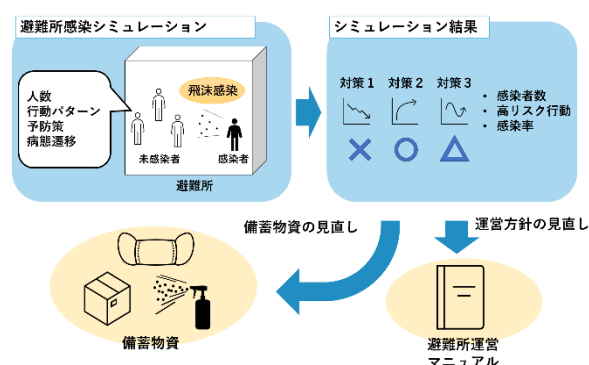


Fig. 1: 研究概要図.

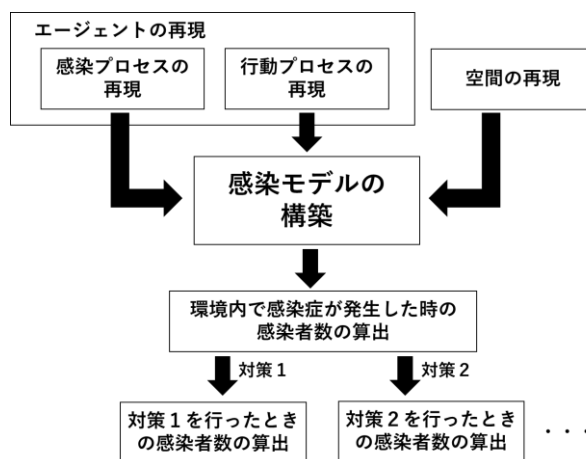


Fig. 2: 本研究の流れ.

3.1. マップの構築

3D モデル作成ツールを使用し、避難所運営ガイドライン¹¹⁾を参考に小学校の避難所を想定した幅 20m、奥行き 30m の避難所を作成した (Fig. 3, Fig. 4). 避難者は大きく7つの居住スペースに分かれ、世帯ごとにまとまって生活する。食事や物資の受け取りは運営本部で行い、トイレや着替えは体育館に備え付けの者を使用すると想定する。3D データを S⁴ Simulation System に取り込んだ際に、エージェントの発生・移動が可能な場所と移動経路を指定することができる。これにより居住スペース上に指定してエージェントを発生させる。今回は避難者の世帯ごとの生活スペースを区切るパーティションの設置について検討するため、移動不可能箇所の設定を利用してパーティションが存在するデータ、存在しないデータの2つを生成した (Fig. 5, Fig. 6).

Fig. 3: 避難所の 3D モデル図.

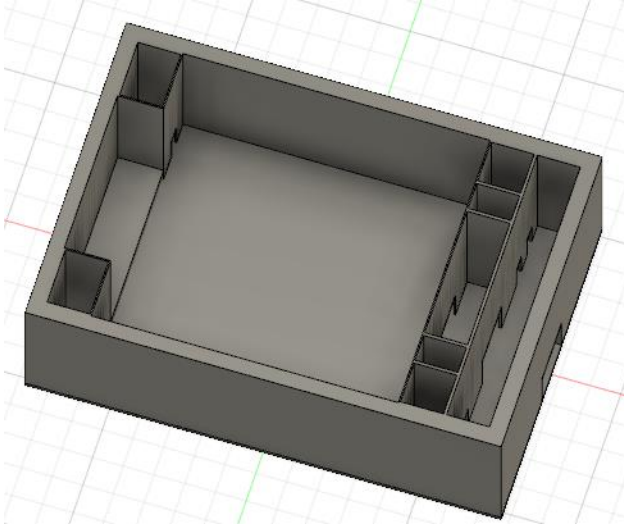


Fig. 4: 避難所の概要図.

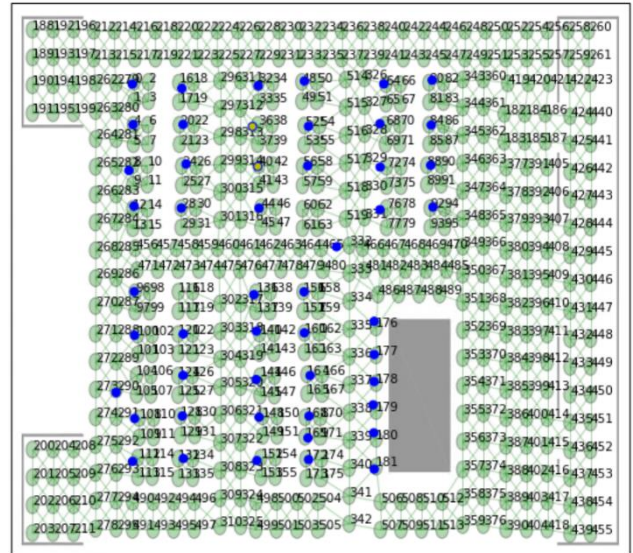


Fig. 5: 避難所パーティションなし.

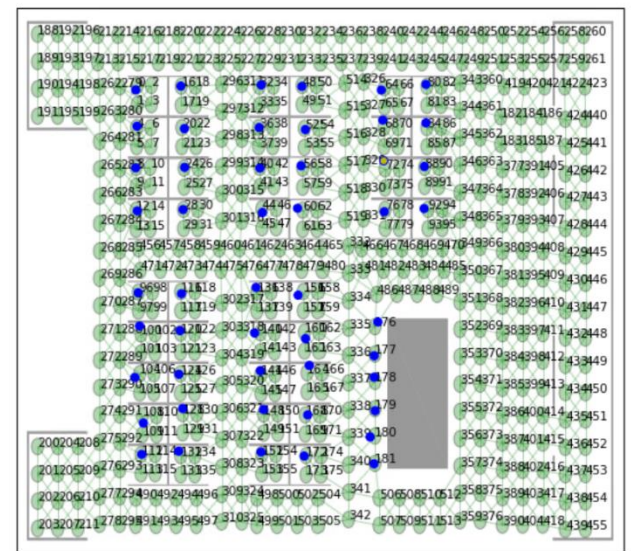


Fig. 6: 避難所パーティションあり.

3.2. エージェントの行動プロセス

行動プロセスとは、シミュレーション空間内で人々が行う特定の行動と、その流れのことである。市川ら⁵⁾は空間が異なると感染リスクも異なることを示したが、これは単に空間の物理的な違いだけではない。家庭では一家だんらんの時間が存在したり、学校の教室では席に座って授業を受けたりと、生活空間には特有の行動が存在する。この特有な行動を再現し、より正確なシミュレータを構築する。

エージェントの行動プロセスの説明をするにあたって、まずはエージェント生成時に設定されるエージェント属性について説明する。エージェント属性は2種類あり、1つは避難所のスタッフか避難者であるかの役割属性、もう1つは病態遷移状態を表す属性である。避難所には災害時に避難してきた避難者はもちろん、避難所を運営する立場であるスタッフが存在する。実際の避難所では避難者も主体的に行動しスタッフと共に

に運営に関わる場合があるが、行動が複雑化するため今回は避難者は避難生活、スタッフは運営活動と明確に役割を分けた。もう1つの属性である病態遷移状態についてはエージェントの感染プロセスで後述する。

今回シミュレーションを行う避難所にはスタッフと避難者の2種類のエージェントが存在することを説明した。シミュレーション内ではスタッフ、避難者共に暇な時間は避難所内の巡回や会話をする。しかし、食事の配布時間ではスタッフは運営本部で配付行為を行い、避難者は運営本部へ食事を取りに行った後自身の居住スペースへ戻り食事を取る。このようにスタッフと避難者が同じような行動をすることはあるものの、それぞれの行動プロセスは別に考える。これを表したフローチャート図がFig. 7, Fig. 8である。青い長方形で囲まれた単語は行動を表す関数であり、オレンジのひし形で囲まれた条件に当てはまるか否かでエージェントが行動を決定する。行動を表す関数はそれぞれTable. 1のような機能を持っている。

Table. 1:行動を表す関数

stayArea	その場にとどまる
eat	運営本部に行き居住スペースに食事を持ち帰る
randomWalk	ランダムな目的地に向かう
returnArea	自身の居住スペースに戻る

Fig. 7 は避難者の行動プロセスを表しており、7 時に起床、8 時 30 分と 12 時と 18 時に食事、その時間以外は避難所内の巡回か他の避難者との会話、もしくは自分の居住スペースで待機している。就寝時間の 22 時には居住スペースへ戻り朝まで待機する。Fig. 8 はスタッフの行動プロセスを表しており、7 時に出勤したのち食事配付時以外は自由に避難所を巡回または運営本部で待機し、19 時の退勤時には運営本部の各待機場所へ戻る。避難者、スタッフ共に 20% の確率で避難所内巡回の選択をする。この 2 つのフローチャート図をまとめたものが Fig. 9 のアクティビティ図である。

Fig. 10 は会話の再現について表している。感染症の主な感染経路である飛沫感染の中でも、20 分の会話は 1 回の咳と同等の感染リスクがあること¹²⁾から、避難所内でも会話を発生させ感染リスクを再現する。エージェントの生成時に総エージェント数の半分の数からランダムな数字を選択し各エージェントに振り分ける。同じ数字のグループのエージェントは知り合いとみなし、半径 1m 以内に同グループのエージェントが入ってきた場合に会話を開始する。1 回の会話時間は 30 分とし、その間は 15 分ごとに感染判定が行われる。

3.3. エージェントの感染プロセス

感染プロセスとは感染経路の再現方法である。感染経路は飛沫感染、空気感染、接触感染が考えられるが、飛沫感染のみを考慮する。飛沫感染では感染者が飛沫を飛ばしたときに一定距離内にいると感染の可能性が発生する。今回は会話の再現により飛沫が飛ぶことを想定する。感染の可能性が発生すると、それぞれの状況に応じた確率で感染する。感染確率は仮数値として 50% に設定した。病態遷移は倉橋の COVID-19 病態遷移モデルを使用する。病態は感染性のみから始まり、発症や重症化、死亡まで確率に従い遷移していく。本研究では不顕性感染者は考慮しないため感染者は全員発症する。また、感染後に発症まで至ったエージェントが確認されると避難所運営が困難であると判断しシミュレーションを終了する。

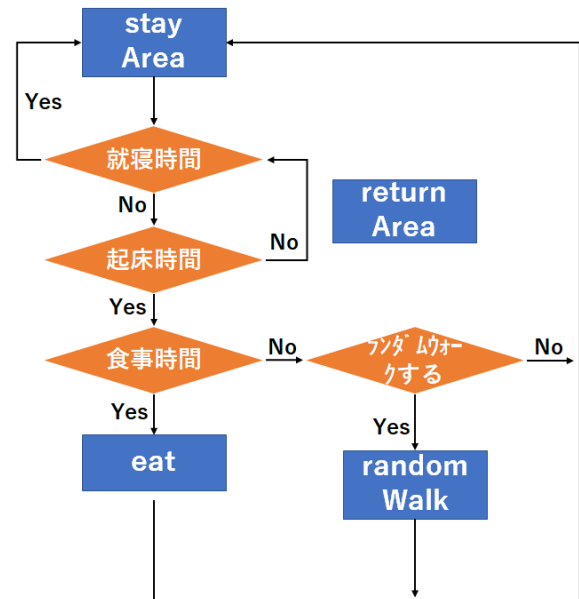


Fig. 7: 避難者の行動プロセスフロー図.

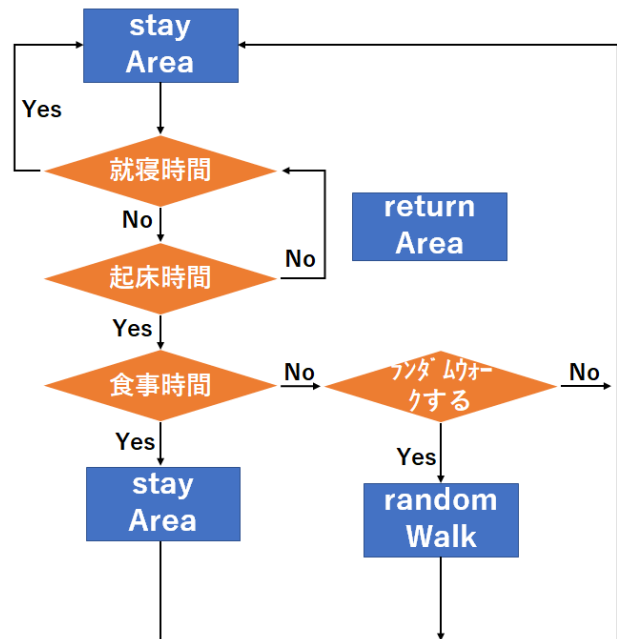


Fig. 8: スタッフの行動プロセスフロー図.

Fig. 9: 行動プロセスのアクティビティ図

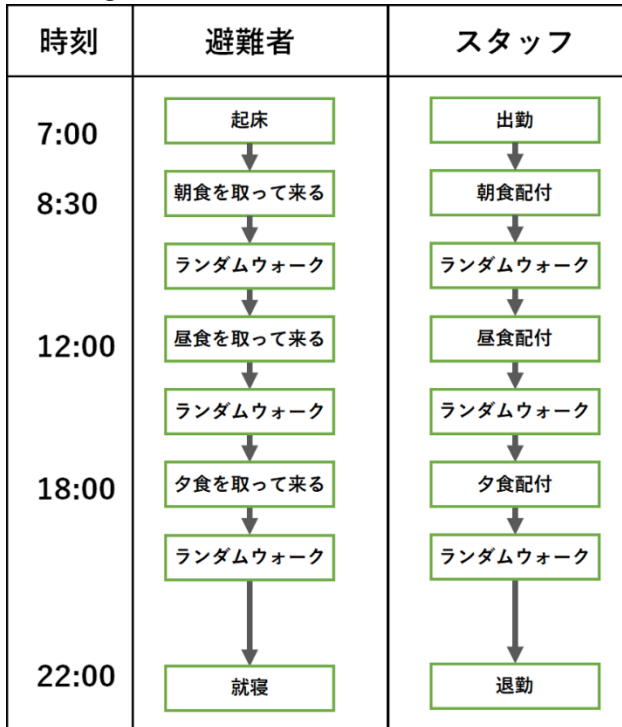


Fig. 10: 会話のフロー図.

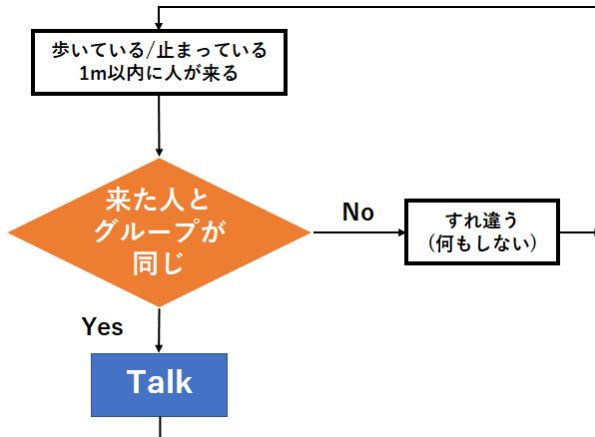
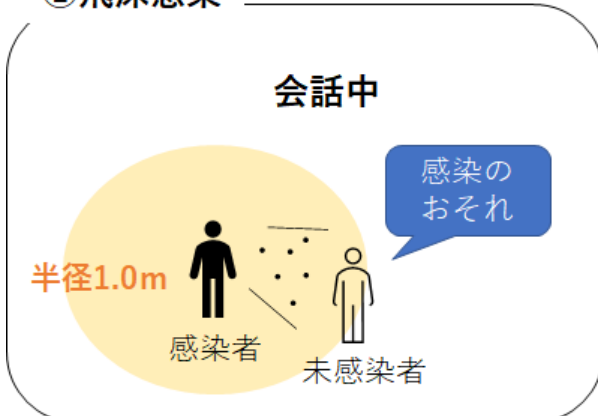


Fig. 11: 飛沫感染の概要図.

①飛沫感染



3.4. 感染対策の実装

感染対策は避難所収容人数の削減、避難所の世帯ごとにパーティションを導入することの2点を想定

し、避難所収容人数は通常時を182人、削減時を50人と決定した。パーティションは最大4人で1つの仕切り内で生活する事を想定する。本論文ではシミュレーション結果の都合上、避難所収容人数の削減を行った状態でのパーティション導入対策の有用性のみを評価し、避難所収容人数が182人である場合のシミュレーションは行わない。

4. シミュレーション結果

避難所の人数を50人と設定し、パーティションを設置していない場合と設置した場合のシミュレーションを3回ずつ行った。この平均値で結果を算出する。このとき、会話により被爆した際の感染率は50%に固定した。シミュレーション結果は以下のように計算し纏める。

<総感染者数>

総感染者数 = 初期感染者 + 感染者

<感染者率>

感染者率 = 感染者数 / 総エージェント数

<追加感染者数>

追加感染者数 = 総感染者数 - 初期感染者数 (1)

<感染者抑制率>

感染者抑制率 = 対策時の感染者率 / 非対策時の感染者率

4.1. パーティション導入の結果

Table. 1 はパーティション導入対策を行った場合と行わなかった場合の感染者数、感染者率をまとめ、対策を行ったときの非対策時からの感染者抑制率を算出した。Fig. 12 は時刻ごとの平均感染者数を表している。Table. 1 より、パーティション導入による感染者抑制率は38.46%、感染者率も16%の差が開き、対策に大きな効果があることが分かった。

Fig. 13 の感染者居住スペース把握図では対策の有無で3回ずつ行ったシミュレーション実行後の感染者の居住スペースを表し、感染症の広がり方を図示している。ラベルは赤が初期感染者、黄緑が0~1日目の感染者、緑が2~6日目の感染者である。図より、対策の有無にかかわらず黄緑色は避難所内の各地に点在しているため、初期感染者が未感染者と接触した際に居住スペースの近さは関係なく感染が発生している事が分かる。1次感染者の発生後、パーティション導入対策を行わなかった場合は緑色の2次感染者が1次感染者の周囲に大きく広がり、パーティション導入がされている場合は1次感染と同じく避難所の点在する場所で2次感染が発生している。パーティションがあれば同じ居住スペース内に入らなければ会話ができないが、パーティションがない場合は、避難者は前後左右から歩いて来る相手と接触し会話を行うことができる。隣近所と会話ができる状況が作られた結果、初期感染者や1次感染者の周囲に感染が広がったと考えられる。

Table. 1 の感染者抑制率、Fig. 13 の感染拡大の様子の2つの観点から、避難所でのパーティションの導入は有効であることが分かった。また、パーティ

ションが存在しない場合は、隣近所の避難者同士で頻繁に会話することはリスクが高いことが示された。

Table. 1:対策非導入時と導入時の感染者率比較

	パーティション非導入	パーティション導入
総感染者数	13 人	5 人
感染者率	26%	10%
追加感染者数	12 人	4 人
追加感染率	24.49%	8.16%
感染者抑制率	－%	38.46%

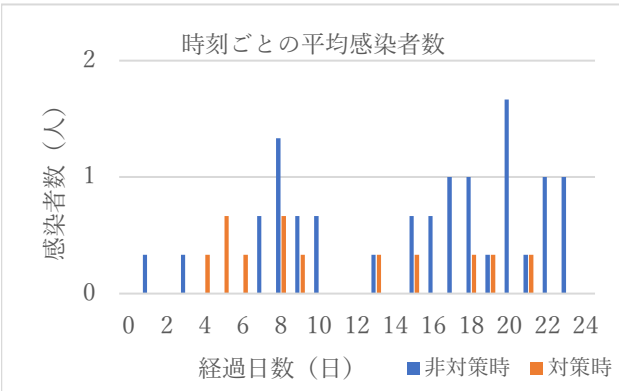


Fig. 12:時刻ごとの平均感染者数.

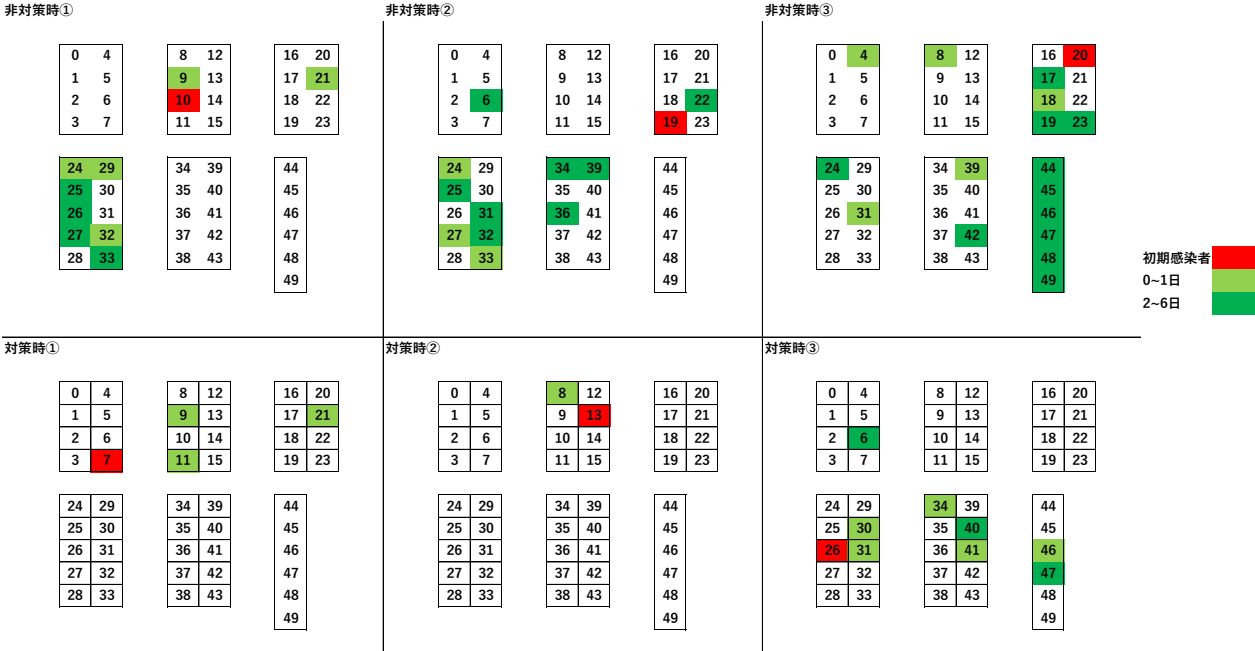


Fig. 12:感染者居住スペース把握図.

5. おわりに

5.1. 結論

本研究の結果から、避難所生活の感染症対策としてパーティションの導入を行うことは有効であることが示された。今回は避難所収容人数を 50 人と設定したが、シミュレーションに使用した規模の避難所の収容人数は約 200 人であり、過去の事例から実際の災害発生時はさらに多くの人が押し寄せる可能性が高い。人々の密集度が高くなるためより感染が広がりやすいのではないかと考える。令和 2 年 7 月豪雨¹⁰⁾では避難所開設後に短期間で想定以上の避難者が押し寄せたことにより段ボールベッドやパーティションの設置が追い付かず、避難所面積も足りなくなったといった事例が存在した。感染症流行下の避難所運営準備としてパーティションを備蓄しておくだけでなく、実際に有効活用するために設置方法の確認や事前訓練を行う必要があるだろう。

5.2. 今後の課題

今回は会話を行う際にのみ感染判定を行ったが、より現実的なシミュレーションにするためには咳と会話の両方を実装し感染リスクを評価する必要がある。感染判定時間の 15 分は新型コロナウイルス接触確認アプリの濃厚接触者判定時間が 15 分であることを参考にしたが、今後咳と会話のリスクを比較するにあたって、咳 1 回分が会話 20 分に相当するという比率に従い 20 分に変更する。また、会話時間は固定ですべて 30 分となっているが、今後乱数で生成するように変更する。

また、飛沫感染のみではなく接触感染や空気感染などの感染経路を実装することにより、より現実に即した感染拡大を再現し、換気や消毒行為などの感染症対策も考慮できる。マスク等の個人の感染防護策についても今後実装し感染拡大の変化を分析する。

6. 謝辞

本研究は、厚生労働科学研究費 新興・再興感染症及び予防接種政策推進研究事業 新興・再興感染症のリスク評価と危機管理機能の実装のための研究 の助成を受けて行ったものである。

7. 参考文献

- 1) 六辻彰二, コロナの余波「食品値上がり」——世界的な買いだめと売り惜しみの悪循環, Yahoo!Japan ニュース, 2020-04-19 <https://news.yahoo.co.jp/by-line/mutsujishoji/20200419-00174034/>
- 2) 感染予防にマスク着用不要 過度の使用控えてと WHO, 日本経済新聞, 2020-03-01 <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO56249640R00C20A3CZ8000>
- 3) 飯田 明由, 国立大学法人豊橋技術科学大学 Press Release, コロナウイルス飛沫感染に関する研究～マスクの効果と歌唱時のリスク検討～, 令和2（2020）年度第3回定例記者会見, p. 2-13, 2020. <https://www.tut.ac.jp/docs/201015kisyakaiken.pdf>
- 4) 梯正之, 感染症流行の数理：データからモデルまで(<特集>感染症の数理モデル), 14 巻 2 号, p. 113-125, 2004 https://www.jstage.jst.go.jp/article/bjsiam/14/2/14_KJ00003509930/article-char/ja
- 5) 倉橋 節也, 新型コロナウイルス(COVID-19)における感染予防策の推定, 人工知能学会論文誌, 2020 年 35 巻 3 号 p. D-K28_1-8. https://www.jstage.jst.go.jp/article/tjsai/35/3/35_D-K28/article-char/ja
- 6) 下馬場有祐, 林潤英, 中井豊, 市川学, 新型インフルエンザ発生時のオフィス内感染抑制のシミュレーション, 第 22 回 社会 シ ス テ ム 部 会 研 究 会 . 2019 <http://journals.socsys.org/symposium022/list.html>
- 7) 市川 学, 薛 姣, 齋藤 智也, 藤本 修平, 出口 弘, 生活空間におけるインフルエンザ感染シミュレーションを用いた感染プロセスの分析. 2016. https://www.msi.co.jp/s4/solution/userscase_pdf/ichikawa.pdf
- 8) “新型コロナ 災害避難をどうする”, NHK クローズアップ現代+, 2020-05-13. <https://www.nhk.or.jp/gendai/articles/4414/index.html>
- 9) 遠藤 史郎, 徳田 浩一, 八田 益充, 國島 広之, 猪俣 真也, 石橋 令臣, 新井 和明, 具 芳明, 青柳 哲史, 山田 充啓, 矢野 寿一, 北川 美穂, 平瀬 洋一, 賀来 満夫: 東日本大震災後の避難所において発生した A 型インフルエンザアウトブレイク事例. 日本環境感染学会誌. 27 巻 1 号, p. 50-56, 2012. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsei/27/1/27_1_50/article-char/ja
- 10) コロナ対策で3割の避難所が収容制限 豪雨被害4県でアンケート, 2020-08-04, NTK NEWS WEB. <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20200804/k10012549531000.html>
- 11) 静岡県浜松市, 浜松市避難所運営マニュアル②,

- https://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/kiki/disaster/bou-sai/hamamatu_j/documents/checklist.pdf
- 12) 見えない飛沫、正しく回避 スパコン「富岳」で可視化, IT media NEWS, 2020-10-20. <https://www.itmedia.co.jp/news/articles/2010/20/news053.html>