

# エージェントシミュレーションによる感染症感染リスクの評価 —咳気流の数値解析と環境マイクロバイーム解析の統合—

東京都市大学  
本堂 雄也

## 1 緒言

都市部の人口密集化と建物の気密化の進行により、感染のリスクが高まっていることを背景に、感染症流行のリスクへの対応は社会全体にとって看過できない課題となっている。感染症の流行は、感染症を引き起こす細菌やウイルスなどの病原物質が人の活動する環境中で拡散して生じるため、この拡散速度を制御する必要がある。

拡散速度を制御するためには病原物質を特定し、人の集団内での病原物質の伝播機構を明らかにする必要があるが、この病原物質の同定は困難であった。特に病原物質の伝播は接触時に生じる接触感染として高頻度に発生するとされているが接触感染を定量的に評価する手法は確立されていない。そこで、環境中の微生物の集まり（マイクロバイーム）への遺伝子解析に着目した研究により、病原物質の直接・間接接触による伝播可能性が整理されている [1]。この遺伝子解析技術による病原物質伝播の研究結果を反映させた、病原物質の伝播予測が可能なモデルの開発が求められている。

また、接触感染には直接・間接接触感染の他に咳などによって生じる飛沫を介した感染経路の飛沫感染がある。この飛沫感染による感染リスクは咳気流に伴う飛沫飛散の数値解析により評価手法が検討されている [2]。

そこで本研究は、病原物質伝播に関する研究をもとに特定建物内の集団内での病原物質の伝播予測を行うことを目的として、建物内の病原物質に対する評価手法の検討を行った。

## 2 評価手法の検討

感染症の感染は人の活動する環境中で生じるため、人の活動する環境を表現する必要がある。そこで、本研究ではエージェントシミュレーションを実在建物のような空間に適用し、その空間内でのエージェントの行動に伴う感染症感染リスクの評価を行うこととした。対象とした空間は病院の外来区画とした。病院の外来では感染性のある病気をを持った患者（感染者）とその他の患者（感受性保持者）が存在すると考えられる。感染者と感受性保持者の2種類のエージェントに別け、そのエージェントが空間内で行動した場合の感染症感染予測を行う。

### 2.1 モデル構築

計算対象とした建物は実在病院の外来区画を模した Fig. 1 に示すような簡易的な空間を作成し、その中で外来患者に伝播していく感染症シミュレーションを行った。

また、外来受診時の患者の行動を受付→待合室→診察の順に巡回し、退出後エージェントは消滅し、新たな別のエージェントが生成され行動を繰り返すものと定義し、各施設への滞在時間を Table 1 に示す。行動ルールの実行中に生じる扉への接触に際して病原物質の伝播の計算を行う。

患者の空間中での歩行ルールは Fig.2 に示すように、空間中に目的地となる施設に Point を定義し、目的地に対して想定される動線を Link として定義することでその動線上を歩行するものとした。また、その動線同士が交わる点と Point として定義することで、Point と Link に対して最短経路探索法である Dijkstra 法を適用し、空間内でエージェントが目的地に対する最短経路を認識し、行動するものとした。

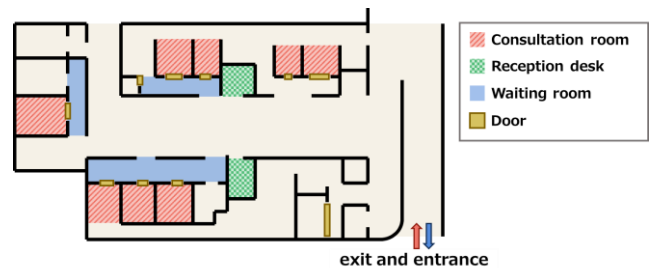


Fig. 1 病院の外来区画

Table 1 各施設利用時の所要時間

	Staying Time [minute]	Time step [Step]
Reception desk	0.5 ~ 1.0	60 ~ 120
Waiting room	5.0 ~ 10.0	600 ~ 1200
Consultation room	5.0	600

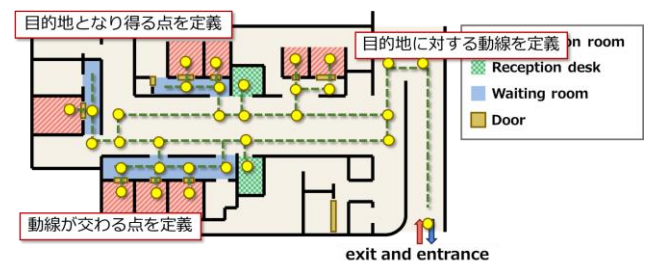


Fig. 2 空間中の Point と Link の定義

### 2.2 間接接触感染による感染リスクの検討手法

建物内の集団に対する感染症感染リスクを評価する指標として、集団内の各個人が保有する病原物質の量を定義する。本研究では、集団を感染者と感染者ではない人

(感受性保持者)に別け、感染者の保有する病原物質(=感染症感染リスク)の量を1.0、感受性保持者の保有する病原物質は0.0であると仮定する。

次に、建物内で集団が扉を開けて部屋に入室する際に生じるドアノブへの病原物質の伝播を定義する。

1回の接触当たりの手から建材(今回はドアノブ)に伝播する病原物質の割合を伝播率と呼び次式で定義されている<sup>[1]</sup>。

$$\text{伝播率} = \frac{\text{採取菌数}}{\text{散布菌数} \times \text{建材からの採取率}} \quad (1)$$

また、建材から手への伝播率は次式で表される。

$$\text{伝播率} = \frac{\text{採取菌数}}{\text{散布菌数} \times \frac{\text{手のひらの面積}}{\text{建材の面積}} \times \text{手のひらからの採取率}} \quad (2)$$

これらの伝播率をもとにドアノブを介した病原物質の伝播を表現し、集団における感染症感染リスクを評価する。すなわち、感染者がドアノブに触れることで、感染者のもつ病原物質が(1)式の割合でドアノブに伝播し、その後未感染者がそのドアノブに触れることで、(2)式の割合でドアノブから未感染者に病原物質が伝播することになる。

以上の長谷部らによる病原物質伝播の実験結果をFig.2に引用する。今回は病院内の扉はデコラ(化粧合板)と仮定する。実験結果より、感染者のエージェントが目的地への移動に際して扉に接触した場合の計算式は次式で表す。

$$\left( \begin{array}{c} \text{接触後の} \\ \text{扉の病原物質} \\ \text{保有量} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{接触前の} \\ \text{扉の病原物質} \\ \text{保有量} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{接触前の} \\ \text{感染者の} \\ \text{病原物質保有量} \end{array} \right) \times 0.0282 \quad (3)$$

また、感受性保持者が同様に扉に接触した場合は次式のように計算を行う

$$\left( \begin{array}{c} \text{接触後の} \\ \text{感受性保持者の} \\ \text{病原物質保有量} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{接触前の} \\ \text{感受性保持者の} \\ \text{病原物質保有量} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{接触前の扉の} \\ \text{病原物質保有量} \end{array} \right) \times 0.0967 \quad (4)$$

以上の計算をFig.4に示す図の感染性物質伝播(病原物質の伝播)の計算で行うことで病院内の扉を介した間接触感染による感染症感染リスクを評価する。

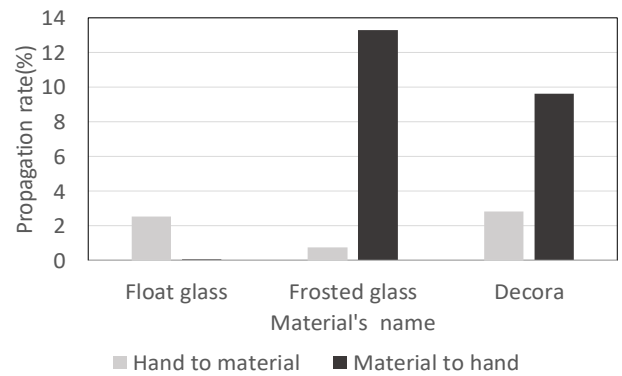


Fig.3 素材による伝播率の違い (文献 [1]より引用)

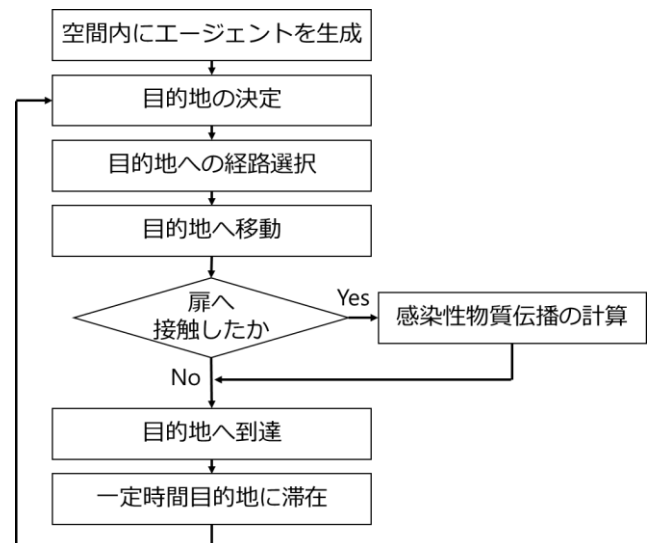


Fig.4 間接触感染に関する計算フロー

### 2.3 間接触感染による感染リスクの検討内容

本検討でのシミュレーションの前提条件は、病院の外来区画に感染者、感受性保持者の2種類の患者エージェント20人を生成し、各エージェントがFig.4に示すフローに則り行動及び計算を行うものとする。また、感染症流行の速度は感染者と感受性保持者の割合によって大きく変化する。よって、本モデルでは感染者の割合によってどのような変化が生じるか検討するために感染症流行の初期を感染者割合10%、中期を感染者割合50%、末期を感染者割合90%として各ケース計算を行い感染症流行状況による病院外来での病原体の伝播速度について検討する。

### 2.4 飛沫感染による感染リスクの検討手法

飛沫感染による感染リスクの検討では、感受性保持者が感染者の咳による飛沫が及ぶ範囲内に存在する時間を評価する。Fig.5に示すのは数値解析による飛沫の口腔内への付着量に関する研究(太田)による距離ごとの口腔内への飛沫の付着量の解析結果を引用したものである。Fig.5より、咳により飛沫を呼出した相手から0.9m離れた

場所での付着量が最大となっており、1.0 m 以内に飛沫が集中して飛散していることが分かる。解析結果より感染者の半径 1.0 m 以内に静止及び通過した際には感染のリスクが生じるとみなし、感受性保持者の存在する地点から半径 1.0 m 以内に感染者がいるという状況が生じた場所を記録し、その積算時間を評価する。

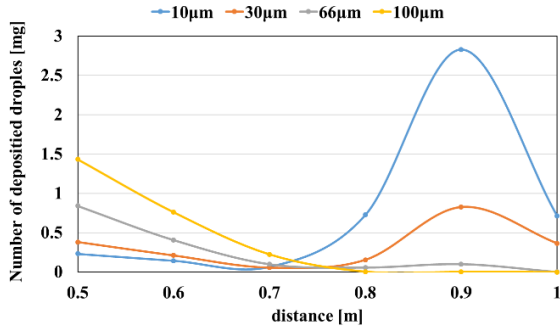


Fig. 5 距離ごとの口腔内への飛沫の付着量 (文献 [2]より引用)

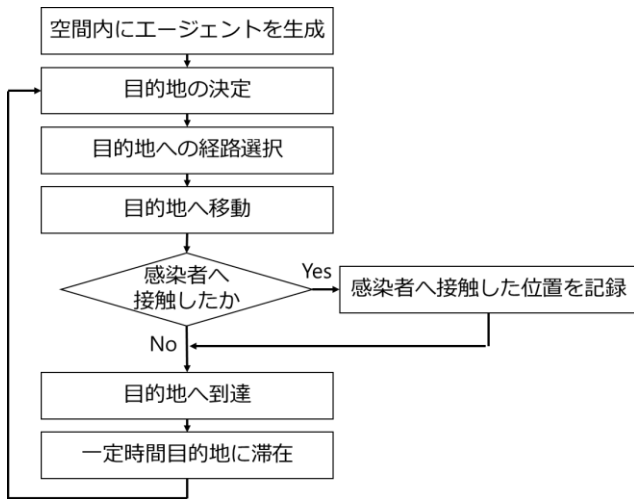


Fig. 6 素材による伝播率の違い

### 2.5 飛沫感染による感染リスクの検討内容

本検討での前提条件の間接接触感染による検討と異なる部分は、感染者と感受性保持者の接触位置を記録することにある。つまり、感染者の 1.0 m 以内に「接近」した場合、咳気流による飛沫感染が生じるものと仮定し、接近時間の積算時間および位置を分析した。

### 3 計算結果

集団内の感染者の割合による感染症感染リスクへの影響を Fig.7 に示す。来院者の感染者割合を 10%、50%、90%とした時、中期以降ではエージェントが保有する病原物質量(≒感染症感染リスク)の平均値が 4 時間以内に 1.0 を超えた。感染者の病原物質量が 1.0 としたことから、4 時間以内に来院者の保有する病原物質量が 1.0 を超えたということは、4 時間以降では感染者の手に付着している病原体の量と同等以上の

病原体が来院者に付着していると考えることができ、4 時間以内に扉に対して環境対策を行うことが重要であるということを示唆している。

Fig.8 より、感染症の割合 10%の場合と 90%の場合を比較するとおよそ 2.9 倍、90%の場合の方が感染者を生成する結果となった。新たに感染する人は少ないが、感染性物質が早い段階で扉に蓄積することからこのような結果となったと考えられる。

また、感染者の割合が 50%となる感染症流行中期には感染者の飛躍的に増加することがグラフから読み取れる。

次に、飛沫感染による感染リスクの検討結果である、患者の接触位置と接触時間の分布を Fig.9 に示す。カラーバーが感染者への接触時間を示しており、建物内での接触位置でプロットした図となっている。図を見ると、診察室内、待合室に比べると通路等では接触時間は 0 に近い値となっていることが分かる。このことから、移動中などの一時的な接触と比較すると、静止中の接触感染リスクは多く特に待合室では接触リスクが高いと考えられる。

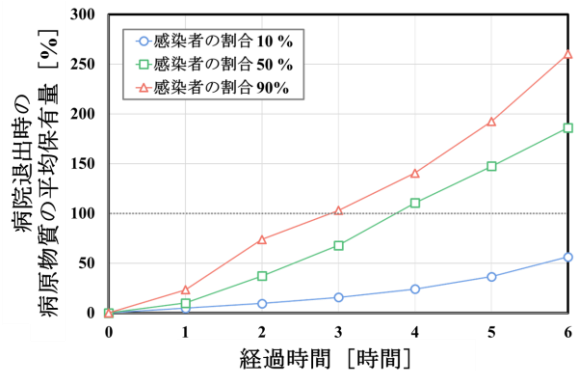


Fig.7 患者が保有する病原体の量の推移

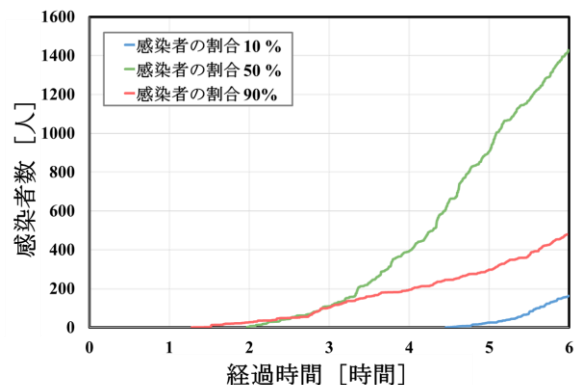


Fig. 8 感染者割合ごとの感染者数推移

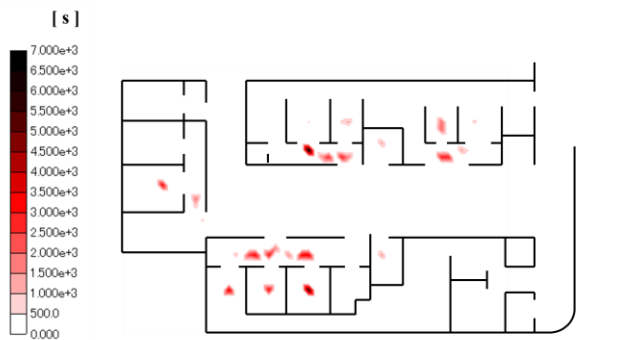


Fig. 9 患者の接触位置と接触時間

#### 4 結言

本研究では、社会問題の一つである感染症に着目し、感染症リスクの評価及び観測シミュレータを開発し、数理疫学モデルでは想定が難しい行動の多様性や接触の違いを想定した感染リスクを示した。今後の課題として、接触場所の違いやその伝播率の違い、飛沫・空気感染のメカニズムを考慮したシミュレータを開発することを目指す。

#### 5 参考文献

- [1] 長谷部花奈, “遺伝子解析技術を用いる接触感染リスクの定量的評価手法の開発 手のひらの細菌採取率と接触による細菌伝播率の検討,” 日本建築学会, 2017.
- [2] 太田優介, “感染症拡大モデルの開発-咳による飛沫飛散の数値解析と飛沫感染リスクの評価-,” 2018.
- [3] E.W.DIJKSTRA, A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, Numerische Mathematik 1, 1959, pp. 269-271.
- [4] 山影進, 人工社会構築指南: artisoc によるマルチエージェントシミュレーション入門, 書籍工房早山, 2007.
- [5] 石田亨, “エージェントの基礎と応用,” 1995.
- [6] 西浦博・稲葉寿, “感染症流行の予測: 感染症数理モデルにおける定量的課題,” 統計数理研究所, 2006.