

シミュレーションを用いたコロナウイルス感染の分析

石川県立金沢泉丘高等学校理数科

池田 純 岡部 祐奈 中村 莉玖 三谷 裕希 山本 優耶

要旨

2021年3月現在、世界中で新型コロナウイルス感染症が蔓延しており、日本でも地域によっては二度目の緊急事態宣言が発令されるなど、感染拡大が収まる気配はいまだにない。私たちは、現在とられている感染症対策がどれほど有効なのかを調べ、ウイルスの蔓延の終息に貢献したいと考えた。そこで私たちはシミュレーションソフトを使って、一般的な感染症対策であるマスクの着用による感染予防の効果について調べることにした。代表的なマスクの繊維の種類ごとにシミュレーションを行ってみると、繊維によってマスクの着用効果に大きな差があることがわかった。

1. 研究背景・目的

2020年1月28日、日本で初めて感染が確認され、2021年3月19日現在、感染者数は日本では45万人、世界全体では1億2000万人を超え、未だに感染拡大が止まらない新型コロナウイルス。私たちはウイルスを含んだ飛沫(以下、ウイルスと定義)の動きをシミュレーションすることで、現在知られている感染症対策の有効性を確認した。また、感染拡大の要因を追求することで、人々の感染拡大防止に対する意識を向上させ、感染拡大を少しでも食い止めようと思い、この研究を始めた。

2. 実験方法

(1) 実験の目的

私たちは、現在行われている新型コロナウイルス感染防止対策の有効性を調べるにあたり、最も一般的に行われている対策であるマスクの着用に注目した。マスクの有効性を調べるため、「artisoc」と呼ばれるソフトを用いて、空間と物体のモデルを作成することでシミュレーションを行った。このソフトでマスクの繊維とウイルスのモデルを作り、ウイルスの動き方を設定し、咳などで体内から放出されたウイルスがマスクによって何%の割合で防がれるのかを調べた。

今回の実験では、ガーゼマスクと不織布マスクの2種類のマスクについて調べた。ガーゼマスクとは、いわゆる布マスクのことで、繊維の網目が規則正しく配列されているマスクである(図1)。一方、不織布マスクとは、一般に市販されているマスクを指し、繊維を乱雑に絡めることで網目を作っているマスクのことである(図2)。不織布マスクはガーゼマスクに比べて繊維が細い・繊維数が多いと

いった特徴があるため、網目の大きさが小さい(ウイルスを除去する面でのマスクの性能が高い)といった特徴を持つ。反対に、ガーゼマスクは網目が大きい代わりに通気性に優れている。

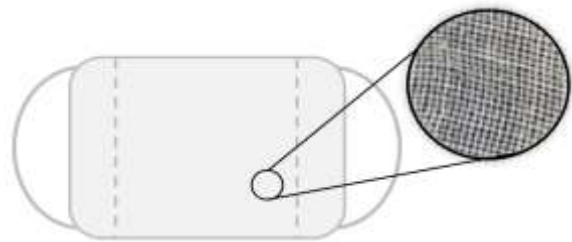


図1 ガーゼマスクの構造

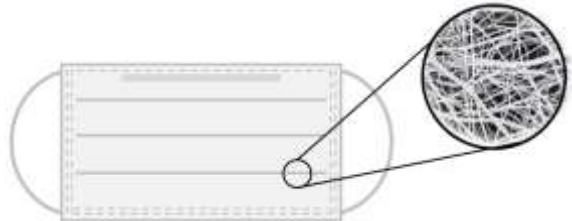


図2 不織布マスクの構造

(2) 実験の手順

実験には、山影進著、「人工社会の可能性 01 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」録のソフトウェア、artisocを用いた。

咳やくしゃみをした際の口(ウイルスが放出される場所)とマスクの距離は十分に近く、飛沫は重力の影響を受けないとして実験を行った。また、シミュレーションは二次元平面上で行った。以降、artisocのプログラム内での操作を示す。

1. ソフトを起動した後、シミュレーションを行う正方形型の平面空間(200×200, ウイ

ルスの半径は 0.05 とする)を作り、空間の中央にマスクの繊維を配置する(図 3)。繊維およびウイルスのモデルはプログラム上では円形として処理し、繊維のモデルについては、シミュレーションを行う空間内において、経過を見やすくするために正方形で表示させた。

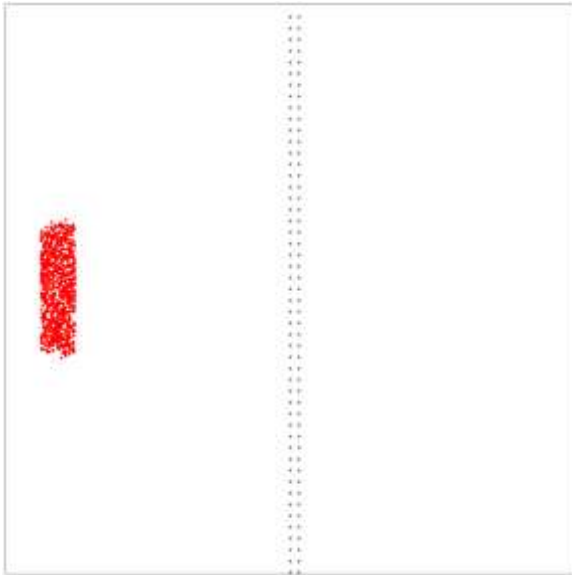


図 3 空間内への繊維の配置

※図中央の点線がマスクの繊維、左側の赤い円の集まりがウイルスである。

[ガーゼマスクの場合]

ウイルスの半径 0.05 に対し、繊維 1 本の半径を 1.0 として等間隔に縦一列に配置する。二層マスク・三層マスクの場合は、層間に 2.0 だけ間隔をつくり、マスクの各層をそれぞれ平行にして繊維を配置した。

[不織布マスクの場合]

ウイルスの半径 0.05 に対し、繊維 1 本の半径を 0.02~0.05 のランダム値としてマスクの繊維部分(200×5.6)に満遍なく繊維のモデルが配置されるようにした。

※ウイルスの半径と繊維の半径の比は実際のウイルスやマスクのサイズを考慮して設定した。

2. ウイルスのモデルを空間の左側中央に配置し、水平右向きから $\pm 7^\circ$ の範囲にウイルスが放射状に運動をするようプログラムする。ウイルスは一定の時間間隔で自身の向きを $\pm 1^\circ$ の範囲で変えることにする。また、ウイルスはシミュレーションの 1 ステップ((3)注意点を参照)の間に 0.16~0.32 のランダム値だけ移動することにする。

3. ウイルスが運動した結果、ウイルスがマスクの繊維と接触した(ある繊維とウイルスのモデルの中心間の距離がその繊維とウイルスの半径の和より小さいか等しい)場合、ウイルスが運動を停止する(マスクの繊維に付着する)プログラムを施す。

4. 一連の動きをシミュレーションし、全てのウイルスが

- ・繊維に付着した または
- ・繊維を通り抜けた

のどちらかの状態になったとき、全ウイルス中、マスクの繊維に付着しているウイルスの割合(マスクが放出を防いだウイルスの割合)を計算する。シミュレーションには誤差が含まれるため、同じシミュレーションは 20 回ずつ行った(図 4・図 5・図 6)。

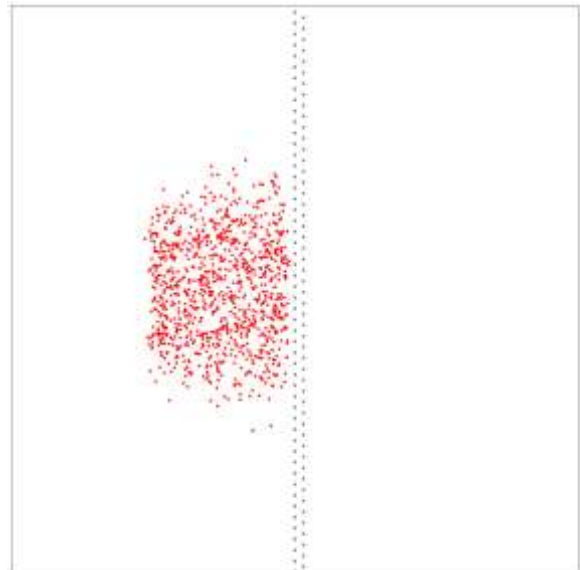


図 4 ウイルスが繊維に付着する直前の様子

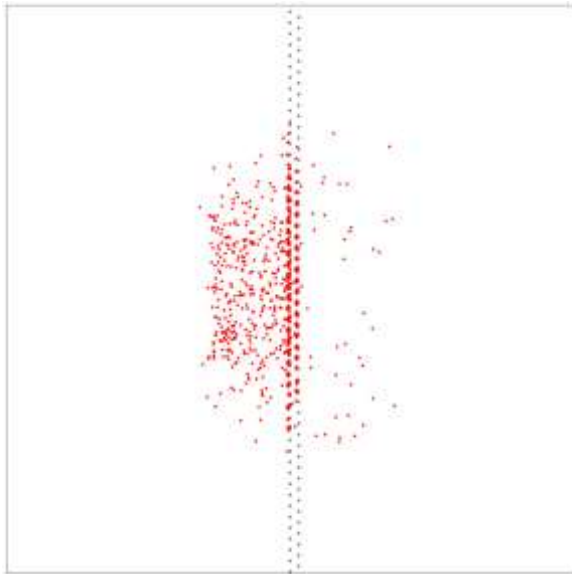


図5 ウイルスが繊維に付着する様子

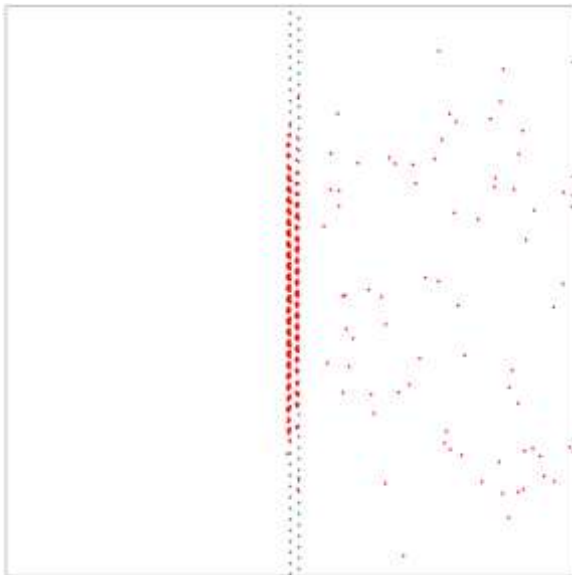


図6 シミュレーションが完了したときの様子

(3) 注意点

シミュレーションを推測できる実際の結果に近づけるため、ウイルスが運動する速度をできるだけ小さくした。この変更を必要とする背景として、artisoc のシミュレーションでは各々のモデルがステップというソフト内の時間単位に従って行動することが挙げられる。

この実験では、(2)実験方法の 3. で紹介した、ウイルスがマスクの繊維に付着したとしてウイルスの運動を停止させる命令の判断基準である、ウイルスとマスクの繊維のモデルの中心間の距離を、1 ステップごとに各々のウイルスで調べるプログラムを施した。そのため、ウイルスが 1 ステップの間に移動する

距離が長すぎると、実際にはマスクの繊維に接触しているにも関わらず、接触している期間にウイルスとマスクの繊維のモデルの中心間の距離が調べられず、ウイルスがマスクの繊維に引っかかることなく通過してしまう可能性が高まる。このことから、ウイルスの 1 ステップの間に移動する距離をできるだけ短くすることで、シミュレーションを正確なものにした。

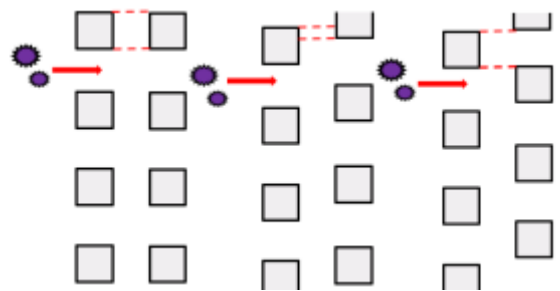
また、今回の実験ではマスクの繊維がウイルスを捕集する際に働く分子間力を考慮しておらず、マスクの繊維がウイルスと衝突する際には必ずウイルスがマスクの繊維に付着すると仮定している。

3. 実験結果

実験はガーゼマスクで一層構造のものを一種、ガーゼマスクで二層構造のものを三種、不織布マスクを一種の計五種類の構造でウイルス除去率をそれぞれ算出した。ガーゼマスクで二層構造のものは、二層の繊維のずれ方によってマスクが捕集するウイルスの割合が変化することが考えられたため、三種類の構造を用いた。用いた二層構造は

- ・二つの繊維にずれが全くないもの—①
(ずれの大きさが最小)
- ・二つの繊維のずれが小さいもの—②
(ずれの大きさが最大と最小の間)
- ・二つの繊維が互い違いのもの—③
(ずれの大きさが最大)

の三つである(図7)。



①(ずれ無し) ②(ずれ小) ③(ずれ最大)

図7 ガーゼマスク二層構造のずれの違い

下記のグラフはマスクの各構造においてシミュレーションを 20 回行った際、マスクがウイルスの外気への放出を防いだ割合(これをウイルス除去率とする)を示している。ウイルス除去率は、ウイルス 1000 個をマスクの繊維に向けて放出した際に何%のウイルスがマスクの繊維に付着するかを調べることで計測している。各項目において、最大値・最小値・平均

値などを箱ひげ図で示している。ガーゼ二層①が①、ガーゼ二層②が②、ガーゼ二層③が③の除去率を示している(図8)。



図8 各構造におけるウイルス除去率

実測値はそれぞれ、

ガーゼ一層

平均値:54.0% 最小値:50.4% 最大値:57.2%

ガーゼ二層①(ずれ無し)

平均値:66.8% 最小値:64.8% 最大値:69.3%

ガーゼ二層②(ずれ小)

平均値:78.4% 最小値:76.1% 最大値:80.3%

ガーゼ二層③(ずれ最大)

平均値:90.1% 最小値:88.3% 最大値:91.5%

不織布

平均値:99.7% 最小値:99.5% 最大値:99.8%

となった。

この結果から、マスクの層数が多いほどウイルス除去率が高く、層数が多い中でも二層間の繊維のずれが大きいほどウイルス除去率が高いことが分かる。また、網目が規則正しくできているガーゼマスクに比べて、網目が不規則にできている不織布マスクの方がウイルス除去率が高く、その除去率は100%に近かったことが分かる。

4. 考察

今回の実験から、ウイルス除去率が、マスクの断面に占める繊維の割合より高くなっていることが分かった。具体的に言えば、ガーゼマスクの一層構造において、マスクの断面に占める繊維の面積の割合が50%あったが、ウイルス除去率はその50%よりも高い54.0%になった。その理由として、ウイルスの進行方向がマスクの面に垂直でないためにウイルスが繊維を通る途中でマスクの繊維に引っかかったことが挙げられる。

また、ガーゼマスクにおいては、ガーゼマスク二層で繊維を互い違いに配置する、つま

り二層間のずれをできるだけ大きくすることで、ウイルスの除去効率が高まることが分かった。

加えて、ガーゼマスクに比べて繊維が細い、繊維数が多い、網目が小さいといった特徴を持つ不織布マスクを用いると、ほぼすべてのウイルスを除去できることが分かった。

この不織布マスクの層数を増やすことで、ウイルスを確実に除去できる可能性が高まると考えられる。(ただし、繊維の総面積が増加すると通気性が悪くなるという欠点もあるので、できるだけ細い繊維を緻密に絡めることで、通気性を確保する必要があると考えられる。) 以上のことから、ガーゼマスクより不織布マスクのほうがウイルスを除去するという観点においては適していると考えた。

5. 結論

今回の実験から、

- マスクの構造によってウイルス除去率が大きく異なること
 - ガーゼマスクより不織布マスクの方がウイルスを10%~45%程度捕集しやすいこと
 - 飛沫によるウイルス感染の観点から、マスクの着用により感染拡大の防止が期待できること
- の3つのことが分かった。

6. 今後の展望

今回の実験から、マスクの着用によるウイルス除去率を、マスクの構造ごとに求めることができた。今後の実験では、今回の結果を用いて、感染予防対策が施された社会空間(実際の市街地を参考にした空間)を作り、そこで感染の広がり方についてシミュレーションを行い、ウイルス感染拡大の要因を追究していきたい。

また、感染症の流行について、SIRモデルと呼ばれる微分方程式が知られている。SIRモデルのSは未感染者数、Iは感染者数、Rは回復者数を表している。今回用いた微分方程式は、

$$dS(t)/dt = -\beta * S(t) * I(t)$$

$$dI(t)/dt = \beta * S(t) * I(t) - \gamma * I(t)$$

t:経過時間 β :感染率 γ :回復率

である。

図9のように、この微分方程式をプログラム言語の一つである「Python」を用いて差分化した数値解と、実際に公表されている感染者数との比較を試みた。しかし、この二つの値に大きな差があり、比較することができな

かった。この原因の一つとして、陽性の判断方法として主流である PCR 検査が一部の人にも限定的に行われていることが挙げられる。そこで、今後は正確性のある死亡者数の値に着目して研究を進めていく予定である。

<http://venus.iis.u-tokyo.ac.jp/newresearch/pdf/0306.pdf>
2020年9月17日

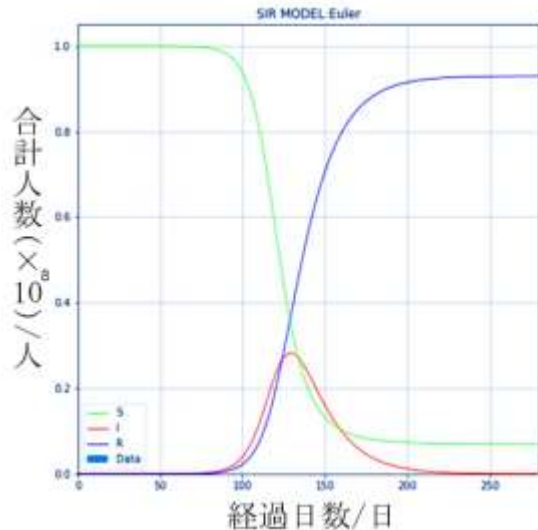


図9 SIRモデルの数値解のグラフ

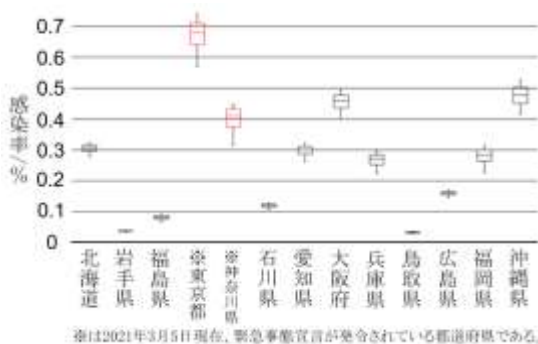


図10 都道府県別の新型コロナウイルス感染率 (2021年1月13日～1月31日)

また、都道府県別の累計感染者数を調べ、感染率を図10のようにまとめた。その結果、感染率が都道府県ごとに大きく異なることが分かった。今後は感染率に違いが生まれる理由を考察することで、ワクチンを配備する地域の優先順位についても考えていくつもりである。

7. 参考文献

山影進 (2007). 『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』. 書籍工房花山

東京大学生産技術研究所. 大岡研究室 菊本研究室 (2020). 咳による飛沫並びに飛沫核の飛散特性から見た室内換気対策.