

感染症パンデミックの時空間ダイナミクス解析

佐々木真*、荒川弘之**、安本晋也***、杉田暁***、伊藤公孝****

*日本大学生産工学部、**島根大学、***中部大学国際 GIS センター、****中部大学先端研究センター

1. はじめに

感染症の流行は、遡れば 14 世紀のペストや 1918 年のスペイン風邪、1980 年代におけるエイズ流行、2002 年の SARS やデング熱・マラリア等、突発的な流行が間欠的に起こり、現代社会の脆弱性を顕にしてきた。特に近年では、人間の行動特性の変化も伴い、感染症の流行頻度が上がっている。特に、現在問題となっている新型コロナウイルス（COVID-19）は瞬く間に世界中に広がり、各地で猛威を奮っている。国内でも連日のように感染者数の時系列データが報じられており、まさに喫緊の大問題となっている。

感染症の時系列発展についての研究は Kermack, McKendrick による SIR モデルと呼ばれるモデルの定式化に始まる [1]。SIR モデルはペストの流行曲線をうまく説明することで、その有用性が示された。現在ではその派生モデルも多く開発されてきているが、本質的物理学は SIR モデルに含まれている。新型コロナウイルスの時間的振る舞いも、SIR モデルを基に多くの議論がなされている [2-5]。一方で、空間的な感染症の広がりについては、SIR モデルに拡散項を付加したモデルの解析が報告されているが [6, 7]、多くの研究は空間挙動を考慮していない。また、感染者数の空間広がり、ウィルスの持つ性質（感染確率や潜伏期間・重症度）とヒトの行動特性（1 日の移動距離や人口密度）から決まるため、単純な拡散過程に従うことも自明ではない。空間伝播特性がわかれば、感染症の空間広がりに対する制御指針を得ることが可能となり、各都市間の結合を考慮した感染症対策が可能となる。

そこで本研究では、モンテカルロシミュレーションを基礎とし、感染者数分布の時空間ダイナミクスを調べ、空間伝播の性質を明らかにする事を目指す。研究で用いるシミュレーションコードでは、ウィルス特性やヒトの行動特性を入力し、2 次元空間上の感染者空間分布の速度分布関数を含む時間発展を出力する。シミュレーションで得られた数値データを解析することで、拡散過程の性質を整理した。本シミュレーションでの設定では、感染確率が低い場合は早い拡散となり、拡散過程を超える速さで空間伝播する可能性がある事がわかった。また、得られた拡散係数から評価する拡散時間は、現実の都市間の流行の時間遅れと矛盾しない。本研究の位置づけは図 1 の通りである。本課題は、感染症特性と人の行動特性の複合的問題であり、行政機関への意思決定支援の基礎を与えるものである。

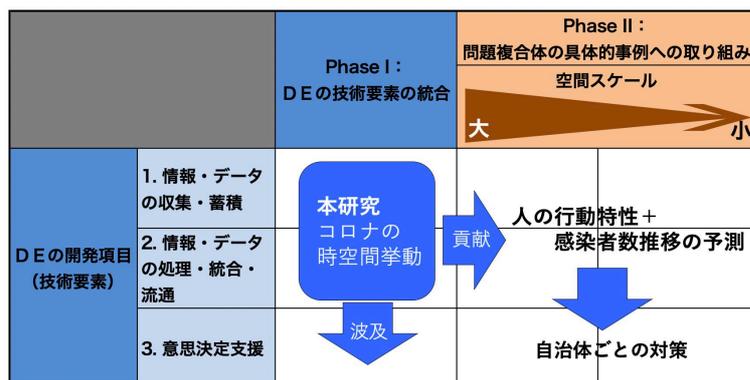


図 1 本研究の位置づけ

2. 方法

本研究では、PHITS コードと呼ばれるモンテカルロを基礎としたシミュレーションコードを使用した [1, 2]。PHITS コードは原子力機構が中心となって開発され、もともとあらゆる物質中での様々な放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬するために開発された計算コードである。現在では、様々な拡張が行われ、放射線施設的设计、医学物理計算、放射線防護研究、宇宙線・地球惑星科学など様々な分野での応用

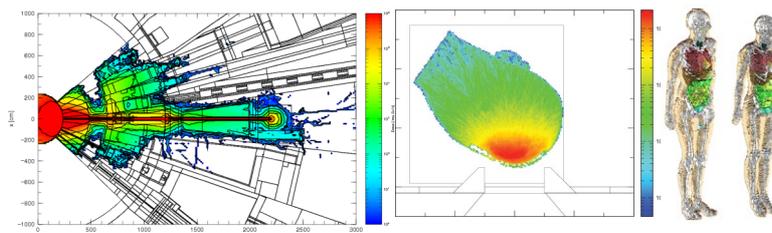


図 2 PHITS コードのアウトプット例：加速器遮蔽設計（左）、放射線治療（中央）、防護研究（右）

が始まっている（図2）。その一環として、近年新型コロナウイルスの挙動予測を目指し、コロナ感染者の時空間挙動の計算を行える拡張がなされた。

PHITS コード内でのモンテカルロ計算は、感染者の速度分布関数 $f(x, v, t)$ を解くことに相当する。すなわち、次式のようなボルツマン方程式の計算を実行していることになる。

$$\partial_t f + \{H, f\} = C(f, g) - \lambda f \quad \text{式 1}$$

ここで、 H はハミルトニアンであり、本研究では感染者の運動は自由粒子として扱う。右辺の第一項が感染者と非感染者の衝突、右辺第二項は崩壊項であり、これらの項によって感染者が増減する。崩壊過程については、図3のように、感染から回復、もしくは死亡を表現する[8, 9]。感染者の速度依存性については、入力で制御することが可能であり、本研究のベース条件としては、発症前は平均速度 500m/day、発症後 100m/day とする。また、発症者の 9 割が入院し、1 割は市井という設定で計算を行った。ここで、背景人口密度は時間・空間的に一定とし、感染者数が非感染者に比べ十分少ない場合を考える。

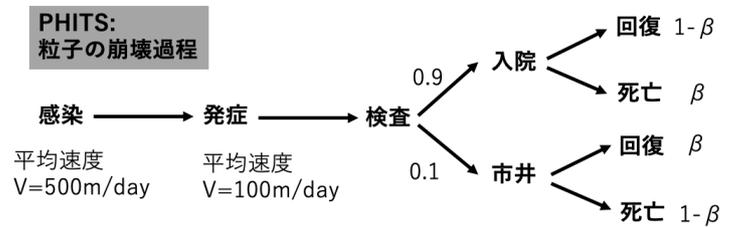


図3 PHITS コード内の崩壊過程[8]

3. 結果

本研究では、1) 人の行動特性調査を行い、PHITS コードに入力する速度分布関数の大雑把な評価を行い、2) 得られた速度分布関数を基に、空間伝播特性の計算を行った。

3-1. 人の行動特性調査：速度分布関数の評価

ヒトの行動特性の性質を考慮するために、国土交通省の全都市交通特性調査をもとに[10]、速度分布関数の大まかな評価を行った。図4に評価した1日の移動距離の統計分布を示す。上部から5-14歳、15-64歳、65歳以上の3つの年代別の特性を評価した。若年層では平均移動距離は少なく、中年層では移動距離が大きいことがわかった。ここで、移動距離 20km の値が中年層・高年層で大きくなっているのは、20 以上の度数を全て 20 に丸め込んでいるためである。移動距離分布の裾野は広く伸びた形をしており、ガウス過程のような単純な統計に従っておらず、大雑把にはレヴィ分布でフィットが可能である。図4の実線はレヴィ分布によるフィット曲線である。

そこで、PHITS コードに入力する速度分布関数の形状をレヴィ分布に選定することとした。従来の PHITS シミュレーションでは、ガウス分布を仮定した計算が行われていたので、比較のためにガウス分布、レヴィ分布のそれぞれについての計算を実行し、行動特性と空間広がりの違いを調べることにした。ガウス分布、レヴィ分布の関数形状は次式で与えられる。

$$f(p) = \sqrt{\frac{1}{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{p^2}{\sigma^2}} \quad \text{式 2}$$

$$f(p) = \sqrt{\frac{c}{2\pi}} \frac{e^{-c/2p}}{p^{3/2}} \quad \text{式 3}$$

シミュレーションでは、裾野の広がり効果を明確にできるようピーク値（平均速度）は揃えたシミュレーションを実施した。

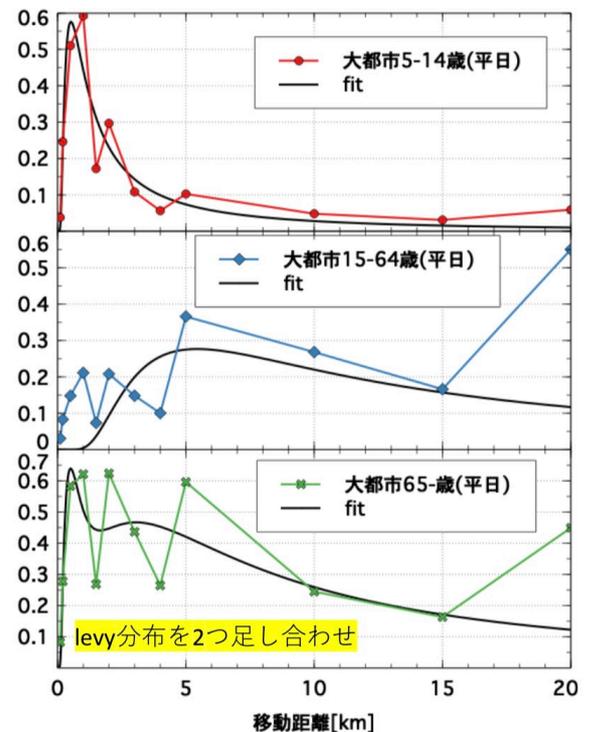


図4 年代別の移動距離分布

3-2. PHITS シミュレーションによる感染者数分布の挙動

上述のような速度分布関数を入力し、PHITS シミュレーションを実施した。図 5 に 2 次元空間上での感染者分布のスナップショットを示す。ここで、感染者数分布は

$$I(x, t) = \int dp f(x, p, t) \quad \text{式 4}$$

のように、感染者の速度分布関数について、速度空間積分を実行して算出している。

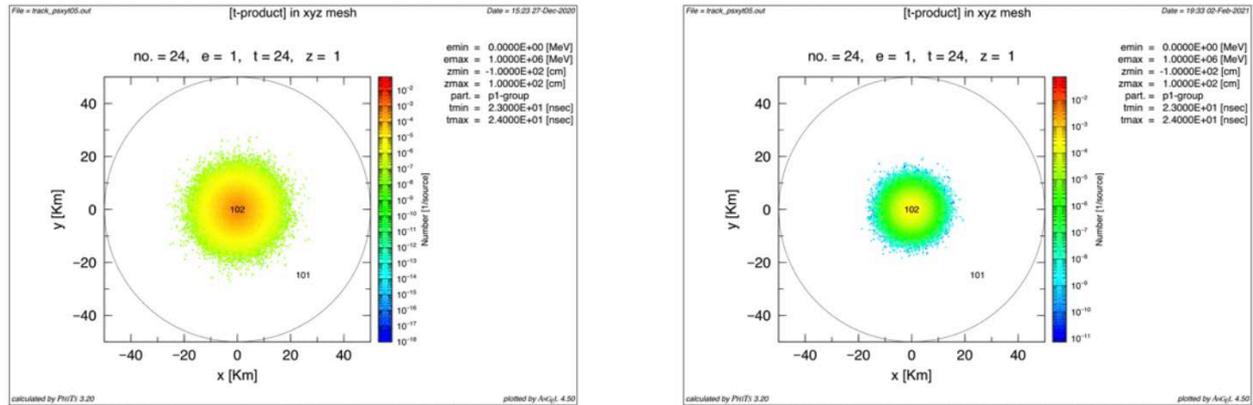


図 5 PHITS シミュレーションで得られた感染者の二次元空間分布のスナップショット
(左：レヴィ分布、右：ガウス分布)

初期条件として中心に感染者を配置し、初期条件から 24 日後のスナップショットである。レヴィ分布はガウス分布に比べ、より遠くの位置まで感染領域が広がっていることが分かる。すなわち、速度分布関数の裾野の影響（言い換えれば、より活動的な感染者）によって、空間的な広がりが早くなる事が分かる。また、入力した速度分布関数に空間不均一性を入れずに、x, y 方向の速度を同様に与えているため、空間的な広がりが同心円状となっていることが分かる。空間分布の様子を半径方向に切り出してプロットしたものが図 6 に示されている。図 6 からレヴィ分布の方がガウス分布に比べ、より遠くまで感染領域が広がることが分かる。入力する速度分布について、x, y 方向速度の不均一性を入れれば、空間分布を歪めることも可能であり、都市の配置により速度分布の不均一性も考慮することも可能である。

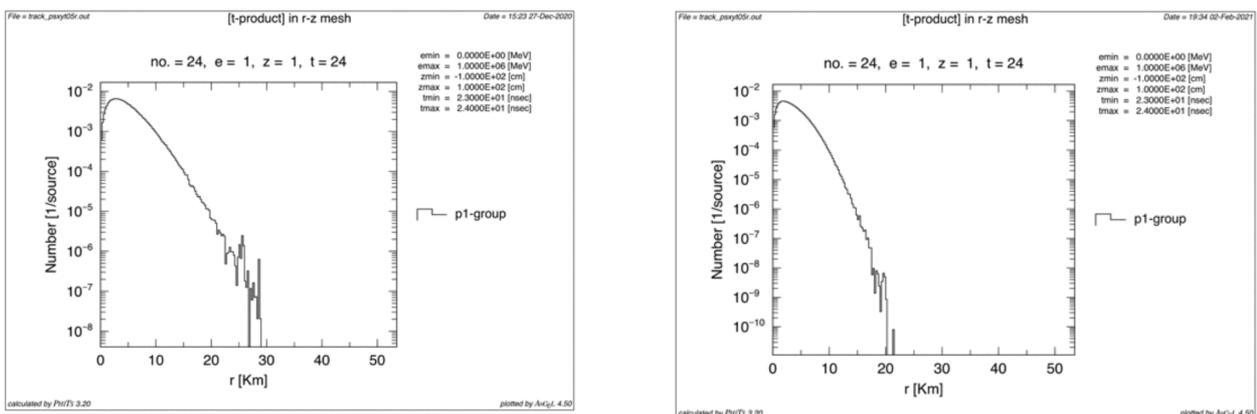


図 6 PHITS シミュレーションで得られた感染者の一次元空間分布のスナップショット
(左：レヴィ分布、右：ガウス分布)

次に、得られた分布関数の情報を用いて、拡散過程の性質を調べた。空間広がり σ を次のように定義する。

$$\sigma(t) = \int (x^2 + y^2) f(x, y, t) dp dx dy \quad \text{式 5}$$

この空間広がり的发展の様子を図 7 に示す。感染確率や平均移動速度を変えた場合の挙動は多くの場合、時

間に対して線形に振る舞っていることが分かる。また、感染確率が低い場合では、時間に線形ではない。空間広がり σ と時間のべき乗の関係によって、次のように拡散の性質が分類できる。

- $\alpha > 1$: 早い拡散
- $\alpha = 1$: 早い拡散
- $\alpha < 1$: 遅い拡散

感染確率を変更し、レヴィ分布とガウス分布のそれぞれの場合において、PHITS コードによるシミュレーションを実施した。シミュレーションのアウトプットから σ を計算し、時間のべき数 α を評価した(図8)。レヴィ・ガウスのそれぞれの分布において、多くの場合は α が1となり、通常の拡散過程として扱うことが可能である事を示している。すなわち拡散項を考慮する事で空間発展を調べることが可能である。一方で、感染確率が小さな場合では、 α が1を超えてしまい、「早い拡散」となることが分かる。この場合は、拡散方程式による記述は不可能であり、取り扱いを別途考える必要がある。また、多くの場合は、拡散過程として記述が可能であるので、拡散係数を評価した。拡散係数においても、レヴィ分布の方がガウス分布の場合に比べて大きくなるのがわかった。感染確率が大きくなると、拡散係数が小さくなるのは、感染すると移動速度が遅くなるためであると考えられる。

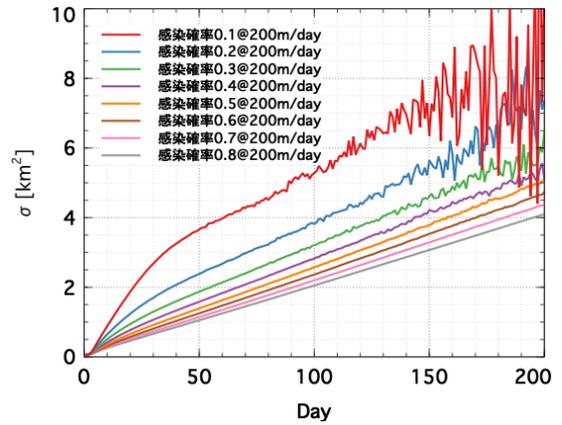


図7 感染領域の空間広がり σ の時間発展

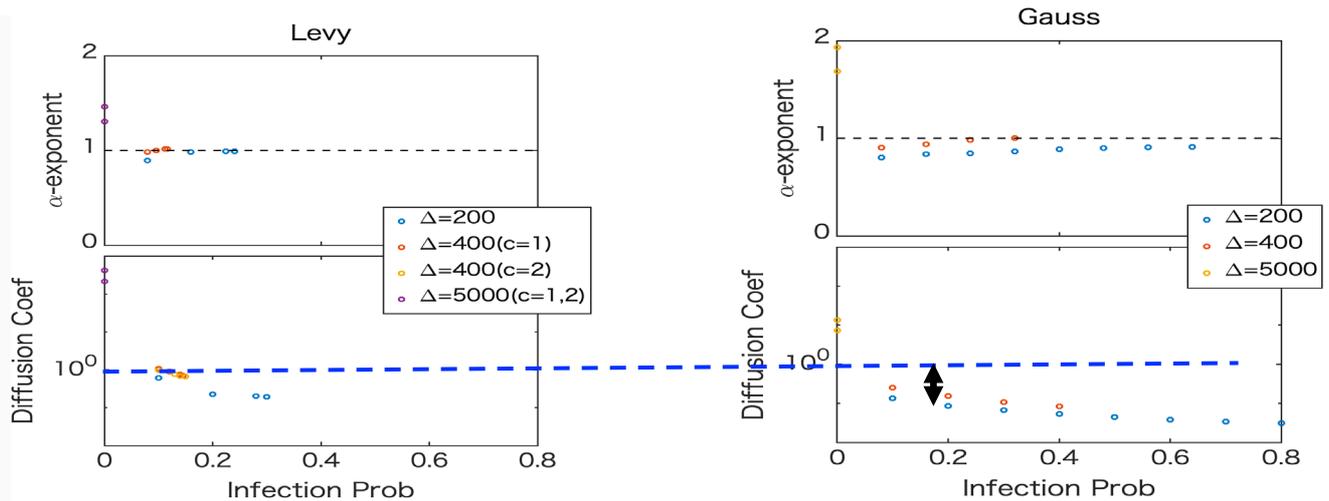


図8 感染確率と時間べき数、及び拡散係数 (左：レヴィ分布、右：ガウス分布)

4. 考察

上述の計算で評価した拡散係数の値を用い、都市別の感染者数の時間的挙動について考察する。しばしば、都市によって、感染者のピークを迎える時期が異なる事がある。ここでは特に東京・千葉間における感染ピークのズレについて考える。これまでの第1-3波の挙動を見ると、優位に東京の感染者数は千葉よりも早くピークを迎え、そのズレは数日程度ある。

この数日のズレは、拡散過程によって感染領域が広がるスピードと矛盾しない。拡散過程による伝播時間は $\tau = x^2/D$ から評価できる。東京千葉間の距離 $x=45\text{km}$ 、拡散係数 $D=420[\text{km}^2/\text{day}]$ を代入すると、拡散で伝わる時間は5日と評価できる。これは観測と矛盾しない値であるが、詳細は今後考える必要がある。

5. まとめ

本研究では、モンテカルロシミュレーションを基礎とし、感染者数分布の時空間ダイナミクスを調べ、空間伝播の性質を整理した。PHITS コードを用い、ウイルス特性やヒトの行動特性を入力し、2次元空間上の感染者空間分布の速度分布関数を含む時間発展を計算した。国土交通省の全都市交通特性調査をもとに、人の

行動特性を調べた。人の速度分布関数がガウス分布からずれた構造をしており、レヴィ分布に近い形である事がわかった。そこで、シミュレーションでは従来計算されていたガウス分布の場合に加え、レヴィ分布を導入できるように、コードの拡張を行った。レヴィ分布を仮定した場合の方が、より早く感染領域が空間伝播する事を示した。また両分布について、感染確率が低い場合は早い拡散となり、拡散過程を超える速さで空間伝播する可能性がある事を示した。得られた拡散係数のオーダー評価から、都市間の流行の時間遅れが拡散係数から評価される伝播時間と矛盾しない事を示した。

6. 謝辞

本研究は中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究 IDEAS202051 の助成を受けたものです。

参考文献・データ

1. W. O. Kermack, and A. G. McKendrick, Proceedings of the royal society A, 700-721 (1927).
2. I. Cooper, et. al., Chaos, Solitons and Fractals, 139, 110057 (2020).
3. Y. Chen, et. al., IEEE Transactions and Network Science and Engineering, 7, 3279 (2020).
4. E. B. Postnikov, Chaos, Solitons and Fractals, 135, 109841 (2020).
5. A. Neves, et.al, Neves, Armando, et. al., Physica D: Nonlinear Phenomena, 413, 132693 (2020).
6. H. Berestycki, et. al., Bulletin of Mathematical Biology, 83, 1 (2021).
7. A. Viguerie, et. al., Computational Mechanics, 66, 1131 (2020).
8. 仁井田 浩二 「モンテカルロシミュレーション PHITS による 新型コロナ感染拡大の解析」、第 66 回 放射線防護研究会
9. T. Sato et.al., J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690 (2018).
10. 国土交通省全都市交通特性調査 https://www.mlit.go.jp/toshi/tosiko/toshi_tosiko_tk_000033.html