

国際航空ネットワーク上での遅れ確率 SIR モデルによる 感染症伝播シミュレーション

佐藤彰洋[†] 澤井秀文^{††} 伊藤功朗^{†††} 岩田健太郎^{††††}

[†]京都大学大学院情報学研究科

^{††}情報通信研究機構

^{†††}京都大学大学院医学研究科

^{††††}神戸大学大学院医学研究科

概要

本研究ではネットワーク上での遅れ確率 SIR モデルを用いた感染症伝播の数理モデルを提案する。2014 年西アフリカでのエボラ出血熱の拡散について、実際の航空ネットワークデータおよび人口データ、WHO による感染者数と死亡者数の公表値を用いた拡散のシナリオシミュレーションを行った。その結果、自己増殖率 R_0 を先進国において極めて小さくできたとしても、発展途上国での自己増殖率 R_0 が 2 に近い場合、パンデミックを起きないようにすることは、先進国だけの努力ではできないことがわかった。

エボラ出血熱(EVD)が 2013 年 12 月に西アフリカで確認されて以来、感染者の増加と感染地域の拡大が続いている。本予稿執筆中の 2014 年 12 月 26 日現在、感染者総数 19,497 名、死者総数 7,588 名に至り、増加の勢いは弱まりつつあるものの、感染者の増加傾向に歯止めがかからない状況である。その結果、WHO エボラ緊急対応ミッション(UNMEER)が設定した 100 日目標(2015 年 1 月 1 日までに(1)感染者の 100%を隔離し、(2)遺体の 100%を二次感染を生じさせることなく安全に埋葬すること)は達成できない見込みと考えられている。

今回の EVD では西アフリカ流行 3 カ国(ギニア、リベリア、シエラレオネ)における未治療での死亡率は 70.8%であると報告されており[1]、適切な治療を受けた場合には死亡率が 43%となる(この治療方法は 2014 年 10 月以降から用いられている)[2]。今回の株では潜伏期間が 6 日から 12 日(平均 11.4 日)で、最長 21 日となることが報告されており、この潜伏期間の長さが感染の拡大と関係していると考えられている[1]。

本研究では、EVD の拡散の傾向を世界的な航空機ネットワークを通じたメタポピュレーションモデルと SIR モデルを併用することにより、データ駆動型の方法によりシミュレーションした結果について報告する。パラメータは実際に WHO が報告している感染者総数と死亡者総数を用い、航空機座席は実際の約 3,700 空港を結ぶ 11 万以上の路線の座席数データをもとに計算を行った。空港を有する都市の人口は Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC) が提供する 5

分間隔メッシュでの 2010 年人口推計値を用いて計算した[3]。

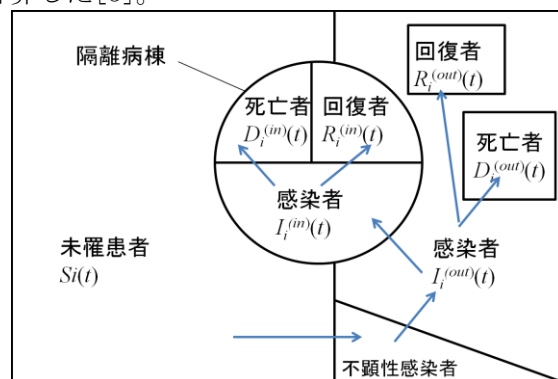


図 1 感染症拡大の概念図

感染者増加のメカニズムは図 1 に示すように、環境中に存在する感染者が未罹患者と接触することにより、新しい感染者を作り出すメカニズムとして理解される。これを遅れ付き確率的 SIR モデルとして連立確率微分方程式に従うモデルを用い定式化した。

時刻 t での都市 i における未罹患者数 $S_i(t)$ 、隔離されていない感染者数 $I_i^{(out)}(t)$ 、隔離病棟外での回復者数 $R_i^{(out)}(t)$ 、隔離病棟外での死亡者数 $D_i^{(out)}(t)$ 、隔離されている感染者数 $I_i^{(in)}(t)$ 、隔離病棟内での回復者数 $R_i^{(in)}(t)$ 、隔離病棟内での死亡者数 $D_i^{(in)}(t)$ とし、都市 i での感染率 α_i 、人為的除去率 γ_i および死亡率 δ_i (治療を受けた場合)、 δ_i^* (治療を受けない場合)、自然除去率 β 、潜伏期間 τ とすると、隔離病棟外で活動している人々の総人口 $N_i^{(out)}(t) = S_i(t) + I_i^{(out)}(t) + R_i^{(out)}(t)$ を用いてこのモデルは以下で記述される。

$$\begin{cases}
 dS_i = -\alpha_i \frac{S_i(t)I_i^{(out)}(t)}{N_i^{(out)}(t)} dt - \sqrt{\alpha_i \frac{S_i(t)I_i^{(out)}(t)}{N_i^{(out)}(t)}} dW_i^{(\alpha)}(t) \\
 dI_i^{(out)} = \alpha_i \frac{S_i(t-\tau)I_i^{(out)}(t-\tau)}{N_i^{(out)}(t-\tau)} dt + \sqrt{\alpha_i \frac{S_i(t-\tau)I_i^{(out)}(t-\tau)}{N_i^{(out)}(t-\tau)}} dW_i^{(\alpha)}(t-\tau) \\
 - \beta I_i^{(out)}(t) dt - \sqrt{\beta I_i^{(out)}(t)} dW_i^{(\beta)}(t) - \gamma_i I_i^{(out)}(t) dt - \sqrt{\gamma_i I_i^{(out)}(t)} dW_i^{(\gamma)}(t) \\
 + \sum_{j=1}^N w_{ji} I_j^{(out)}(t) - \sum_{j=1}^N w_{ij} I_i^{(out)}(t) + \sum_{j=1}^N \sqrt{w_{ji} I_j^{(out)}(t)} dV_{ji}(t) - \sum_{j=1}^N \sqrt{w_{ij} I_i^{(out)}(t)} dV_{ij}(t) \\
 dD_i^{(out)} = \delta_i^* \beta I_i^{(out)}(t) dt + \delta_i^* \sqrt{\beta I_i^{(out)}(t)} dW_i^{(\beta)}(t) \\
 dR_i^{(out)} = (1-\delta_i^*) \beta I_i^{(out)}(t) dt + (1-\delta_i^*) \sqrt{\beta I_i^{(out)}(t)} dW_i^{(\beta)}(t) \\
 + \sum_{j=1}^N w_{ji} R_j^{(out)}(t) - \sum_{j=1}^N w_{ij} R_i^{(out)}(t) + \sum_{j=1}^N \sqrt{w_{ji} R_j^{(out)}(t)} dV_{ji}(t) - \sum_{j=1}^N \sqrt{w_{ij} R_i^{(out)}(t)} dV_{ij}(t) \\
 dI_i^{(in)} = \gamma_i I_i^{(out)}(t) dt - \sqrt{\gamma_i I_i^{(out)}(t)} dW_i^{(\gamma)}(t) - \beta I_i^{(out)}(t) dt - \sqrt{\beta I_i^{(out)}(t)} dW_i^{(\beta)}(t) \\
 dD_i^{(in)} = \delta_i \beta I_i^{(in)}(t) dt + \delta_i \sqrt{\beta I_i^{(in)}(t)} dW_i^{(\beta)}(t) \\
 dR_i^{(in)} = (1-\delta_i) \beta I_i^{(in)}(t) dt + (1-\delta_i) \sqrt{\beta I_i^{(in)}(t)} dW_i^{(\beta)}(t) \\
 + \sum_{j=1}^N w_{ji} R_j^{(in)}(t) - \sum_{j=1}^N w_{ij} R_i^{(in)}(t) + \sum_{j=1}^N \sqrt{w_{ji} R_j^{(in)}(t)} dV_{ji}(t) - \sum_{j=1}^N \sqrt{w_{ij} R_i^{(in)}(t)} dV_{ij}(t)
 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $W_i^{(\alpha)}(t), W_i^{(\beta)}(t), W_i^{(\gamma)}(t), V_{ij}(t)$ はウィナー過程 (Wiener process) であり、 $\langle W_i^{(s)}(t) \rangle = 0$ 、 $\langle W_i^{(s_1)}(t_1) W_j^{(s_2)}(t_2) \rangle = \delta_{i,j} \delta_{s_1, s_2} \min(t_1, t_2)$ 、 $\langle V_{ij}^{(s)}(t) \rangle = 0$ 、 $\langle V_{ik}(t_1) V_{jl}(t_2) \rangle = \delta_{i,j} \delta_{k,l} \min(t_1, t_2)$ を満たす ($s_1, s_2 \in \{\alpha, \beta, \gamma\}$)。よって、報告される累積感染者数は以下で近似できる。

$N_i^{(in)}(t) = I_i^{(in)}(t) + R_i^{(in)}(t) + D_i^{(in)}(t) + D_i^{(out)}(t)$ (2)
 w_{ij} は、1日当たりの都市 i から都市 j への輸送座席数 J_{ij} を用いて $w_{ij} = \rho J_{ij} / N_i^{(out)}(0)$ と求められる。ここで ρ ($\rho=0.65$ を仮定) は搭乗率であり、 $N_i^{(out)}(0)$ は初期状態 ($t=0$) における移動可能な総人口である。

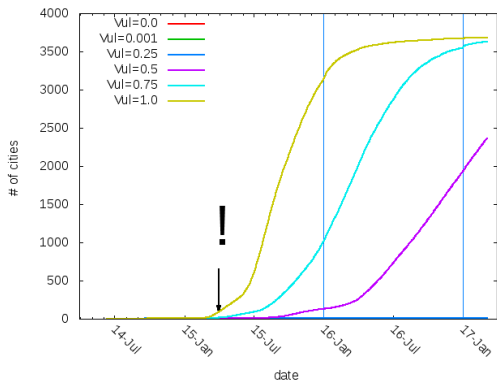


図2 モデルシミュレーションから得られた10人以上の感染者が確認された空港を有する都市の数の先進国の感染率 Vul に対する推移

シミュレーションを行うに当たり、次の仮定を置いた。

1) 発展途上国の感染率はパラメータ推定値を用いる。先進国の感染率は発展途上国の 1/1000

とする。

2) 発展途上国の死亡率は 2014 年 10 月まで 70.8%, 2014 年 10 月以降は 43% とする。先進国での死亡率は全期間に渡り 25% と見積もった。

3) 輸送キャパシティの見積もりに、2014 年 1 月から 12 月までの 3,760 空港 (約 150 万レコード) を結ぶ月次定期旅客線タイムテーブルデータを用いた。

シミュレーションの結果、図 2 に示すように先進国での感染率 Vul を小さくすることによってパンデミックの発生を遅らせることができることがわかった。しかしながら、発展途上国で感染が拡大することは可能であり、発展途上国での感染が拡大するにつれて、発展途上国から先進国に感染者が流入していくことがわかった。また、感染拡大が深刻な西アフリカ 3 カ国 (ギニア、リベリア、シエラレオネ) からの感染者の漏れ率に依って、パンデミックの拡大スピードが変化することがわかった。

本シミュレーションの結果から、医療現場の二次感染発生を極力小さくし、輸送現場において感染地域からの人の移動をできる限り小さくすることにより、EVD のパンデミック発生速度を遅らせつつ、有効な治療薬の開発とその配送経路の確立をパンデミックが深刻となるまでに完了させるべきであるということが判明した。

本研究を実施する上で京都大学田島敬史教授、スイス連邦工科大学 Dirk Helbing 教授、Olivia Woolley 博士との議論が有益であった。本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (C) (#25390152) の財政的支援を受けて行われています。また、本研究は HPCI システム利用研究課題 (統計数理研究所提供) の成果によるものです (課題番号: hp140076)。

参考文献

[1] WHO Ebola Response Team, Ebola Virus Disease in West Africa – The First 9 Months of the Epidemic and Forward Projections, The New England Journal of Medicine, 2014;371(16);1481–1495.
 [2] JS Schieffelin et al. Clinical Illness and Outcomes in Patients with Ebola in Sierra Leone. The New England Journal of Medicine. 2014; DOI: 10.1056/NEJMoa1411680
 [3] Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3): Population Density Grid. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <http://dx.doi.org/10.7927/H4XK8CG2>. Accessed 24 July 2014.

An Epidemic Simulation with a Delayed Stochastic SIR Model for Ebola Virus Disease Based on International Socioeconomic-Technological Database

† Graduate School of Informatics, Kyoto University
 †† National Institute of Information and Communications Technology
 ††† Graduate School of Medicine, Kyoto University
 †††† Graduate School of Medicine, Kobe University