

感染症流行時における人々の移動に関する意思決定のタイミング：宿泊予約データと携帯電話位置情報データの統合分析

Inferring Timing of Human Mobility Decisions During Infectious Disease Outbreaks: An Integrated Analysis of Accommodation Reservation and Mobile Phone Location Data

大森 亮介 (Ryosuke Omori)¹, 伊藤 公一 (Koichi Ito)², 金光 俊輔 (Shunsuke Kanemitsu)³, 木村 隆介 (Ryusuke Kimura)³

¹北海道大学 (Hokkaido University), ²同志社大学 (Doshisha University), ³株式会社リクルート (Recruit Co., Ltd)

e-mail: omori@czc.hokudai.ac.jp

1 序論

感染症流行下において、人々の移動行動は流行拡大と制御に重大な影響を及ぼす。近年では携帯電話の位置情報等を用いた移動行動の可視化が進み、流行と行動の関連性に関する研究が進んでいるが、多くの行動データは「結果」としての移動を記録するに留まり、「意思決定のタイミング」を含意しない。

本研究では、行動の意思決定のタイミングを抽出可能な宿泊予約データを用いて、時々刻々と変化する感染症流行状況に対応した将来の行動への意思決定の更新を推定し、それらの意思決定の最終産物である移動行動と比較することで、人はいつ行動の意思決定を行うかを解析した。

2 方法

時々刻々と変化する感染症流行状況に対応した将来の行動への意思決定の更新の指標「移動回避指標 (mobility avoidance index)」[1]を、2015 年～2023 年のじゃらんネットの宿泊予約データに記録されていた予約およびキャンセルの時系列データから推定した。ある週 t において x 日後の移動に対して行われた新規予約の減少率、および既存予約のキャンセル率をロジスティック関数でモデリングし、それらを最尤法によりデータにフィッティングすることで、移動回避傾向 $\lambda_{t,x}$ を推定した。対象地域は宮城・愛知・大阪・福岡の 4 都府県である。推定された $\lambda_{t,x}$ を用いて、 x 日後の週 t における実際の移動行動がどの程度抑制されたかを数理的にモデル化した。実際の移動行動は、過去の回避傾向の影響が時間的に蓄積された結果であると仮定し、滞在時間 $M_{K,t}^*$ を以下のような数理モデルを構築した：

$$M_{K,t}^* = M_0 \left\{ 1 - \sum_{\tau=0 \dots 53} F_K(\tau) \lambda_{t-\tau,\tau} \right\},$$

ここで、 $F_K(\tau)$ は過去の回避指標が移動行動に与える影響関数であり、 K 個の指数関数の和として表現した ($F_K(\tau) = \sum_{i=1 \dots K} a_i \exp(b_i \tau)$)。最尤法で実際に観測された移動行動データとフィッティングし、BIC を用いてモデル選択を行うことでデータを説明するに最適な指数関数の数 K を決定した。移動行動データには「混雑統計®」の職場と推定されるエリアおよび家庭・職場と推定されるエリア以外における人々の「滞在時間」を用いた。「混雑統計®」デー

タは、NTT ドコモが提供するアプリケーションの利用者より、承諾を得た上で送信される携帯電話の位置情報を、NTT ドコモが総体的かつ統計的に加工を行ったデータ。位置情報は最短 5 分毎に測位される GPS データ（緯度経度情報）であり、個人を特定する情報は含まれない。

3 結果と考察

移動回避指標による滞在時間のモデル推定値は高い決定係数を示した。特に、家、職場以外への移動は、職場への移動と比較して宿泊予約から推定された意思決定プロセスとの関連性が強かった ($R^2 \approx 0.8$)。宿泊予約データは宿泊を伴う行動に限定されるが、この結果は宿泊予約データから抽出された移動回避指標の一般性が支持された。

また、直近の意思決定が実際の移動に強い影響を与えていた。職場以外の場所への移動においては 5 週間以内、職場への移動においては 2 週間以内に行われた意思決定が重要であった。

4 まとめ

本研究では、宿泊予約データから抽出される意思決定プロセスと、実際の移動行動との関係性を定量化した。本研究で明らかになった意思決定から行動までにかかる時間を考慮することにより、感染症流行予測の精度向上が期待される。

参考文献

- [1] Omori R, Ito K, Kanemitsu S, Kimura R and Iwasa Y, Human movement avoidance decisions during Coronavirus disease 2019 in Japan, J Theor Biol, 58. (2024), 111795.

固体の自己駆動体運動に対する反応拡散系モデル

On the Reaction-Diffusion Modeling of a Self-Propelled Rigid Object Motion

本橋 樹 (Natsume Motohashi)¹, 北畑 裕之 (Hiroyuki Kitahata)²,
中田 聡 (Satoshi Nakata)³, 榊原 航也 (Koya Sakakibara)^{4,5},
高埴 圭介 (Keisuke Takasao)⁶, 物部 治徳 (Harunori Monobe)⁷,
中村 健一 (Ken-Ichi Nakamura)⁸, 藤野 拓也 (Takuya Fujino)³,
長山 雅晴 (Masaharu Nagayama)⁹

¹ 北海道大学 (Hokkaido University), ² 千葉大学 (Chiba University),

³ 広島大学 (Hiroshima University), ⁴ 金沢大学 (Kanazawa University),

⁵ 理化学研究所数理創造プログラム (iTHEMS), ⁶ 京都大学 (Kyoto University),

⁷ 大阪公立大学 (Osaka Metropolitan University), ⁸ 明治大学 (Meiji University),

⁹ 北海道大学電子科学研究所 (RIES)

e-mail : motohashi.natsume.b9@elms.hokudai.ac.jp

1 はじめに

樟脳粒子やペンタノール液滴のような界面活性作用を持つ物体は、水面上で表面張力差により駆動する。このような自己駆動体の運動に対する多くの研究が行われており、微生物の運動メカニズムの理解や医療・工学分野への応用が期待されている。数理モデルを通じた理解も盛んであり、例えば、樟脳粒子に対しては、重心の運動方程式と水面上の界面活性剤分子濃度の式をカップリングしたモデルが適用され、理論研究が進められている [1]。一方、液滴に対する数理モデルは数種のモデルが提案されており、その例として体積保存型 Allen-Cahn 方程式を用いた数理モデルが挙げられる [2]。このモデルでは液滴の多様な運動モードの再現に加えて、固体の運動も確認されており、物体の変形を伴うものとそうでないものを統一的に扱える重要なモデルであると言える。しかし、固体の運動は円形の物体に限定されており、固体運動のモデルとしては不十分であった。そこで本研究では、体積保存型 Allen-Cahn 方程式を拡張して、円形以外の形状を持つ固体の運動も再現できる数理モデルの構築を行う。

2 数理モデル

我々は次のような数理モデルを構築した：

$$\begin{cases} \varepsilon^2 \tau \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \varepsilon^2 \sigma^2 \Delta \varphi + \varphi(1 - \varphi)(h^2(\boldsymbol{\xi})(\varphi - 1/2) + \varepsilon a(S[\varphi](t), u)), \\ \frac{\partial u}{\partial t} = \Delta u - u + k\varphi, \\ I \frac{d^2 \theta_c}{dt^2} = \int_{\Omega} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_c) \times \varphi(\mathbf{x}, t) \nabla \gamma(u) d\mathbf{x} - \mu \frac{d\theta_c}{dt}, \end{cases} \quad \begin{matrix} \mathbf{x} \in \Omega, & t > 0, \\ & t > 0. \end{matrix} \quad (1)$$

ここで、 $0 < \varepsilon \ll 1$, $\tau > 0$, $\sigma > 0$, $k > 0$, $I > 0$, $\mu > 0$ である。また、 $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ は領域で、 φ は $0 \leq \varphi < 1/2$, $1/2 \leq \varphi \leq 1$ のときにそれぞれ水面と自己駆動体を表す秩序変数であり、 u は水面上の界面活性剤分子濃度を、 θ_c は自己駆動体の重心の回転角を表す。 \mathbf{x}_c は自己駆動体の重心であり、 $\boldsymbol{\xi}$ は \mathbf{x}_c と θ_c からなる回転座標を表しており、 $h(\boldsymbol{\xi})$ は物体の形状を表現する働きを持つ (図 1(b))。関数 $a(S[\varphi](t), u)$ は次のように定められている：

$$a(S[\varphi](t), u) = \gamma(u) + S[\varphi](t), \quad (2)$$

$$\begin{cases} \gamma(u) = \frac{1}{1 + (u/u_0)^m} + \gamma_0, \\ S[\varphi](t) = \alpha \left(\int_{\Omega} G(\varphi(\mathbf{x}, 0)) d\mathbf{x} - \int_{\Omega} G(\varphi(\mathbf{x}, t)) d\mathbf{x} \right), \\ G(\varphi) = \varphi^2(3 - 2\varphi). \end{cases} \quad (3)$$

ただし, $\gamma_0 > 0$, $m \in \mathbb{N}$, $u_0 > 0$, $\alpha \gg 1$ である. $\gamma(u)$, $S[\varphi](t)$ はそれぞれ表面張力, 体積保存項である.

3 数値計算結果

(1) 式の数値計算例を示す (図 1). ここで

$$h(\xi_1, \xi_2) = \exp \left(p \tanh \left(5 \left(\frac{\xi_1^2}{a^2} + \frac{\xi_2^2}{b^2} - 1 \right) + q(\xi_1^2 - \xi_2^2) \right) \right) \quad (4)$$

を用いた. ただし, $p > 0$, $q > 0$, $a > 0$, $b > 0$ である.

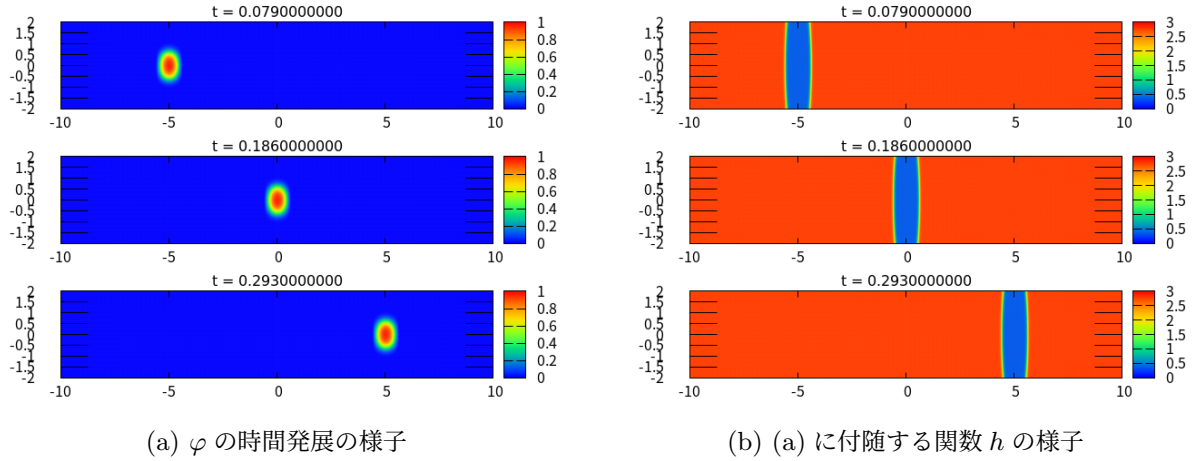


図 1: 楕円形状自己駆動体の短軸方向並進運動解. パラメータは $a = b = 0.8$, $p = 1$, $q = 7.5$

謝辞 本研究は科学研究費補助金 (JP23K20808, JP22K03425, JP23H00086, JP23K20815, JP20H02712, JP21H00996, JP24K22324, JP23K03180, JP23H00085, JP24K00531) および, 「物質・デバイス領域共同研究拠点」の共同研究プログラム (No. 20244003, 20254003, 20241009) の助成を受けたものです. また, 本研究は京都大学数理解析研究所国際共同利用・共同研究拠点の支援を受けて行われました.

参考文献

- [1] K. Iida, H. Kitahata, M. Nagayama, Theoretical study on the translation and rotation of an elliptic camphor particle, *Physica D*, 272 (2014), 39–50.
- [2] M. Nagayama, H. Monobe, K. Sakakibara, K.-I. Nakamura, Y. Kobayashi, H. Kitahata, On the reaction-diffusion type modeling of the self-propelled object motion, *Scientific Reports*, 13 (2023), 12633.

高速道路で発生するハンチング現象の周波数解析

Frequency Analysis of the Hunting Phenomenon on Expressway

矢可部寛太 (Yakabe Kanta)¹, 金城佳世 (Kinjou Kayo)², 岡本和也 (Okamoto Kazuya)³, 友枝明保 (Tomoeda AKiyasu)⁴

¹ 関西大学 (Kansai University), ² 埼玉大学 (Saitama University), ³ 早稲田大学 (Waseda University), ⁴ 関西大学 (Kansai University)
e-mail : k016052@kansai-u.ac.jp

1 はじめに

東名高速道路や名神高速道路などの日本の一部の高速道路では一对の起終点間において右ルートと左ルートに分岐合流する区間が存在しており、交通需要が高い時期にハンチング現象と呼ばれる渋滞が交互に発生と消滅を繰り返す現象が確認されている [1]。実際、東名高速道路のデータ (図 1) を見ると、右ルートと左ルートの交通量が交互に上昇と下降を繰り返していることが分かる。右ルートと左ルートは交通容量の増加を目的としているので、交互に渋滞が発生すると道路本来の目的を果たせていないことになる。また、この区間では分岐前に右ルートと左ルートの混雑状況や事故情報などを提示する情報板が設置されており、運転者の経路選択を支援している (図 2)。

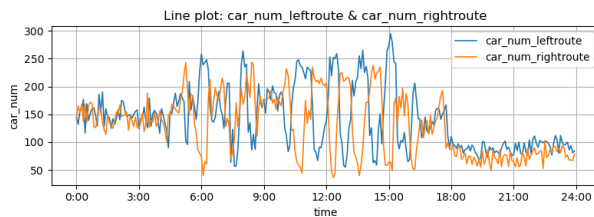


図 1. 2000 年 5 月 3 日の交通量推移データ (東名高速道路 日本)



図 2. 設置されている情報板

先行研究 [1, 2] からハンチング現象は情報の提供遅れが 1 つの原因となって発生することが分かっており、文献 [2] では最も基本的な交通流セルオートマトンモデルの 1 つである ASEP (Asymmetric Simple Exclusion Process) を用いて 2 車線の密度推移シミュレーションや旅行時間の比較などを行っていた。その結果提供される情報をリアルタイムにすることや、予測情報を組み込むことでハンチング現象を抑制することができていた。しかし、ASEP は交通流における重要な性質であるメタ安定を再現できず、メタ安定を再現可能なモデルを用いたハンチング現象の解析は行われていない。また、ハンチング現象における周期構造の情報伝達速度による変化についても明らかにされていない。そこで本研究では、セルオートマトンで現実の交通流の特徴を再現できるモデルの 1 つである SOV (Stochastic Optimal Velocity) モデル [3] と、自動運転車を表現するための前後間車間距離を考慮した CSOV (Controlled-SOV) モデル [4] を用いて密度推移シミュレーションを行った。さらに、シミュレーションで生成された交通流時系列とハンチング現象が観測された実際のデータに対して、離散フーリエ変換 (DFT: Discrete Fourier Transform) を適用することで構造を定量的に解析したので数理モデルと実データを比較しながら報告する。

2 SOV モデルと CSOV モデルによるシミュレーション

SOV モデルまたは CSOV モデルに従う車両を混在させたシミュレーションを行った。シミュレーションにおける道路長は、今井ら [2] と同様に、分岐前の道路を 1 車線で 30 マス、分岐後の右ルートと左ルートを 1 車線ずつで 200 マスとした。また、確率を表すパラメータについて、分岐前の道路に車両が流入する確率を 0.2、出口で車両が出ていく確率を 0.1 とした。分岐地点における意思決定について、すべての車両は経路選択時に分岐後のそれぞれの経路における最大の車列長情報を参照し、短い経路を選択している。参照する情報には現実と同じように遅延を持たせている。また、パラレルアップデートを課し 50000 ステップ計算する過程を 100 回繰り返し、それらのデータに対して平均を取った値について取り扱う。

3 結果とまとめ

図 3 は SOV モデルのみを用いたシミュレーション結果に対して DFT を行った結果である。それに対して図 4 は、SOV モデルと CSOV モデルの台数比が 1:99 の時の結果を表している。SOV モデルのみを用いたシミュレーションではハンチング現象が発生しており、図 3 が示すように周波数が 4.0×10^{-4} 付近で振幅のピークが現れている。一方で、99% を CSOV モデルで動く車両にするとハンチング現象が発生せず、周波数が 3.0×10^{-5} 付近で振幅のピークが現れていた。この周波数 3.0×10^{-5} は周期に換算するとシミュレーション全体を通した密度変動であることから、図 3 の 4.0×10^{-4} 付近の振幅はハンチング現象が発生したことに依存することが明らかになった。本研究におけるシミュレーションでは全ての車両が提供される情報に従って経路選択を行っていたが、実際の現象における運転時に全員が情報に従っているとは限らない。そこで、情報に従う人の割合を考慮したシミュレーションを行い、周期構造の解析をすることが課題となる。また、今回使用した CSOV モデルは前後間の車間距離に依存する最適速度を考慮したモデルであるが、前後間の流量を最適化する速度制御を行うモデルについても同様の検討を行うことも、今後の課題としてあげられる。

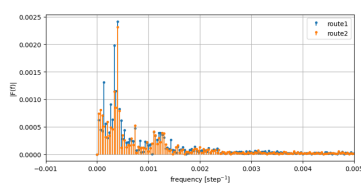


図 3. SOV モデルのみの結果

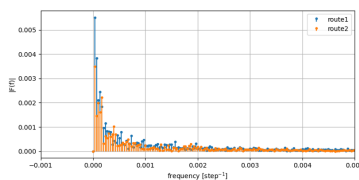


図 4. 99% が CSOV モデルに従う車両にした結果

謝辞 本研究で使用した高速道路の実データは、中日本高速道路株式会社東京支社よりご提供いただきました。貴重なデータをご提供いただきましたことに、心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 大口 敬, 佐藤 貴行, 鹿田 成則, 土木計画学研究論文集, vol.22 no.4 (2005).
- [2] 今井 武晃, 西成 活裕, 応用力学研究所研究集会報告, No.26AO-S2 (2015).
- [3] M. Kanai, K. Nishinari and T. Tokihiro, Phys. Rev. E **72**, 035102 (2005).
- [4] K.Kinjo and A.Tomoeda, Transportation Letters,1-11 (2024).

ネットワーク上の SIR モデルにおける感染率と最大感染者数の関係

The relation between the transmission rate and the maximum number of infectious individuals with SIR model on networks

大住 七重 (Nanae Ohsumi)¹, 小池 正史 (Masafumi Koike)²,
齋藤 雅子 (Masako Saito)², 矢嶋 徹 (Tetsu Yajima)²

¹ 宇都宮大学 大学院 地域創生科学研究科

(Utsunomiya University, Graduate School of Regional Development and Creativity),

² 宇都宮大学 学術院 (Utsunomiya University, Academic Association)

e-mail : mc246873@s.utsunomiya-u.ac.jp

1 はじめに

感染症の流行に適切な対策を講じるためには、流行規模を正確に予測する必要がある。流行規模の指標となるのが最大感染者数である。最大感染者数は、流行のピーク時に一時的に感染している人数である。この値が大きいくほど、伝染の勢いが強く大規模な流行だと考えられる。

感染症の流行における感染者数の時間変化を模したモデルに、SIR モデルがある [1]。本研究では、SIR モデルをネットワーク上に拡張し、接触機会の不均一性を取り入れて感染流行のシミュレーションを行う。複数の異なるネットワークで感染率と最大感染者数の関係を解析し、ネットワークの構造が感染流行に及ぼす影響を調べる。

2 ネットワークと SIR モデル

ネットワークは、複数のノードとそれらを繋ぐ枝から構成される。ノード i から出る枝の数 k_i をノード i の次数という。ノード数 N のネットワークにおいて次数 k のノードが N_k 個あるとき、次数分布を $p(k) = N_k/N$ で定義する。本研究では、完全グラフ、レギュラーランダムグラフ、およびスケールフリーネットワーク [2] を使用する。完全グラフでは全ノードが互いに接続されており ($p(k) = \delta_{k,N-1}$)、一意に定まる。レギュラーランダムグラフでは全ノードの次数が一定 ($p(k) = \delta_{k,k_0}$) で、接続先はランダムである。また、スケールフリーネットワークでは次数分布がべき則に従い ($p(k) \propto k^{-\gamma}$)、大きい次数を持つノードが存在する。

SIR モデルは、感染症に感染しうる未感染状態 S、他者を感染させる感染状態 I、および免疫を持ち流行に寄与しない回復状態 R の間の遷移を記述する微分方程式

$$\frac{dx}{dt} = -\beta xy, \quad \frac{dy}{dt} = \beta xy - y, \quad \frac{dz}{dt} = y \quad (1)$$

をいう。ただし、 x, y, z はそれぞれ状態 S, I, R の人数比で、 $x + y + z = 1$ である。また、 β は無次元化した感染率である。回復率は 1 に規格化した。これをネットワーク上に次のように拡張する。

(i) 各ノードが状態 S, I, R のいずれかをとる, (ii) 状態 S のノードは状態 I のノードと接続している場合、感染率 β で状態 I に遷移する, (iii) 状態 I のノードは一定確率で状態 R に遷移する。

3 シミュレーション方法と結果

2 節で拡張した SIR モデルのシミュレーションを行った。ネットワークをコンフィグモデル [3] により作成し、初期感染者を最大次数のノード 1 つとする。ノードの状態更新を繰り返し、感染者数が 0 になった時点で 1 試行終了とした。各ネットワークでひとつの感染率 β の値に対し数百回程度試行

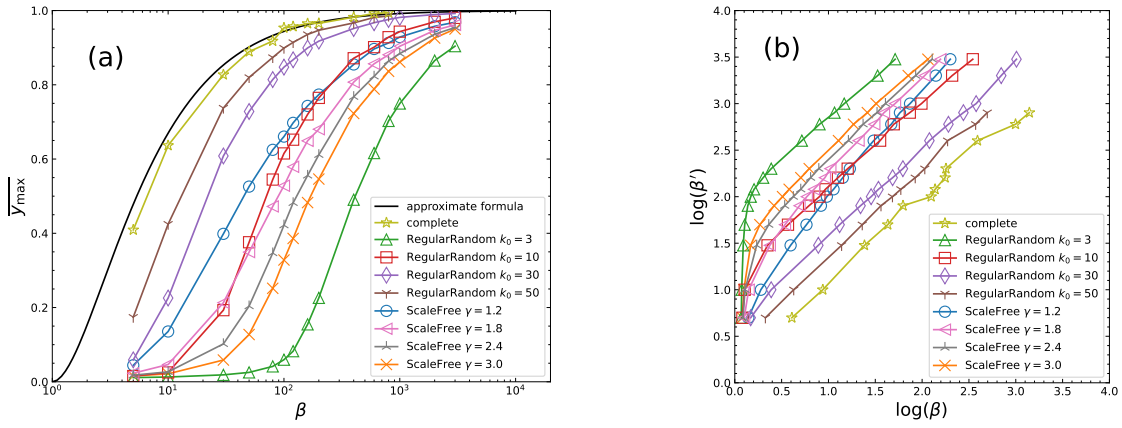


図 1: (a) $\overline{y_{\max}}$ の β 依存性, (b) $f(\beta) = \overline{y_{\max}}(\beta')$ を満たす β と β' の対応関係

して、最大感染者数 y_{\max} の平均値 $\overline{y_{\max}}$ を求めた。

β の値を変化させて試行し、 $\overline{y_{\max}}$ の β 依存性を調べた (図 1(a))。用いたネットワークのノード数は全て 100 である。比較対象として通常の SIR モデル (1) における y_{\max} の近似式 $f(\beta) = 1 - (1 + \log \beta)/\beta$ の曲線をあわせて示す。完全グラフとレギュラーランダムグラフの曲線の形は、 $f(\beta)$ の形と同一で、横軸方向に平行移動したのに見える。それに対し、スケールフリーネットワークではグラフの傾きが $f(\beta)$ より小さく、次数分布の指数 γ が小さいほど傾きが小さい。この違いをとらえるため、 $f(\beta) = \overline{y_{\max}}(\beta')$ を満たす (β, β') の組を求めてプロットした (図 1(b))。 $f(\beta)$ と $\overline{y_{\max}}(\beta)$ が平行移動で重なるならば $\log \beta' = \log \beta + (\text{定数})$ を満たす。完全グラフとレギュラーランダムグラフは概ねこの関係を満たしている。しかし、スケールフリーネットワークは、 γ が小さいほど傾きが 1 より大きい。特に、 $\log \beta \lesssim 1$ においてその傾向が強く見られる。これは、(a) で見られた曲線の傾きの違いを表している。

4 まとめ

流行規模の指標として最大感染者数に着目し、その感染率依存性をネットワーク上の SIR シミュレーションにより調べた。完全グラフとレギュラーランダムグラフにおける最大感染者数のグラフは、通常の SIR モデルから得られる近似式のグラフを平行移動したものととらえられることが分かった。一方、スケールフリーネットワークのグラフは傾きが他より小さいという特徴があり、次数分布の指数が小さいほど傾きが小さかった。この結果は、ネットワークの構造が、その上での感染流行に影響を与えることを示す。

参考文献

- [1] W. O. Kermack and A. G. McKendrick, “A contribution to the mathematical theory of epidemics”, Proc. Roy. Soc. London A **115** (1927) 700.
- [2] A.-L. Barabási and R. Albert, “Emergence of Scaling in Random Networks”, Science **286** (1999) 509.
- [3] M. E. J. Newman, S. H. Strogatz, and D. J. Watts, “Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications”, Phys. Rev. E **64** (2001) 026118.