

Discussion Paper Series

Center for Social and Environmental Systems Research, NIES

No. 2020-02

時空間ランダムウォークモデルによる感染対策の検証

一ノ瀬 俊明

社会環境システム研究センター

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2 国立研究開発法人国立環境研究所

toshiaki@nies.go.jp

田 丹鶴

筑波大学大学院 システム情報工学研究科

李 一峰

(元) 筑波大学大学院 生命環境科学研究科

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の拡大を防ぐため、SIRモデルに代表されるマクロな微分方程式系の計算で得られたと思しき結果をもとに、「人と人の接触機会を8割削減する」ことが提唱されている。こうしたメカニズムを直感的に理解しやすい形で示すことを目的に、特定対象地域の二次元空間（地理空間）におけるランダムな人の動きをランダムウォークモデルで表現し、接触する二者の間での感染を計算するモデルを構築した。またこれを用いて、現在提唱されている「8割削減」の有効性検証を試みた。本研究で示された時空間ランダムウォークモデルによる数値シミュレーションの結果も、異なるアプローチで導き出された「8割削減」の合理性を支持しうるものであった。

キーワード：COVID-19、感染症、感染対策、ランダムウォークモデル、空間モデル

2020 4月



VERIFICATION OF INFECTION CONTROL BY A SPATIAL RANDOM WALK MODEL

Toshiaki ICHINOSE

Center for Social and Environmental Systems Research
NIES, 16-2, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan
toshiaki@nies.go.jp

Danhe TIAN

Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba

Yifeng LI

(Former Affiliation) School of Life and Environmental Science, University of Tsukuba

To stop pandemics of the 2019 novel coronavirus (COVID-19), "80 percent reduction of person to person contact opportunities" is proposed by the Japanese government. This advocacy is regarded to be based on the result of macroscopic differential equation model like SIR (Susceptible-Infected-Recovered) model. For the purpose of indicating person to person's infection mechanism intuitively, a new model to calculate infections between two persons who contact each other was built. This model adopts a spatial random walk model to express random movement of people in a specific 2-D space in a sense of geography. The authors applied this model to verify the effect of the proposed infection control, "80 percent reduction". The result of the numerical simulation could support a rationality of "80 percent reduction" which was derived by different approaches.

Key Words: COVID-19, epidemics, infection control, random walk model, spatial model

本ディスカッションペーパーシリーズは、国立研究開発法人国立環境研究所の研究者および外部研究協力者によって行われた研究成果をとりまとめたものです。関係する方々から幅広く意見やコメントを得るための場として公開しています。

論文は、すべて研究者個人の責任で執筆されており、国立研究開発法人国立環境研究所の見解を示すものではありません。

時空間ランダムウォークモデルによる感染対策の検証

一ノ瀬 俊明¹・田 丹鶴²・李 一峰³

¹ 国立研究開発法人国立環境研究所 社会環境システム研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

E-mail: toshiaki@nies.go.jp

² 筑波大学大学院 理工情報生命学術院 (〒305-0005 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: tiandanhe2017@gmail.com

³ (元) 筑波大学大学院 生命環境科学研究科 (〒305-0005 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

E-mail: likazumine@yahoo.co.jp

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の拡大を防ぐため, SIR モデルに代表されるマクロな微分方程式系の計算で得られたと思しき結果をもとに, 「人と人の接触機会を 8 割削減する」ことが提唱されている. こうしたメカニズムを直感的に理解しやすい形で示すことを目的に, 特定対象地域の二次元空間 (地理空間) におけるランダムな人の動きをランダムウォークモデルで表現し, 接触する二者の間での感染を計算するモデルを構築した. またこれを用いて, 現在提唱されている「8 割削減」の有効性検証を試みた. 本研究で示された時空間ランダムウォークモデルによる数値シミュレーションの結果も, 異なるアプローチで導き出された「8 割削減」の合理性を支持しうるものであった.

Key Words: COVID-19, epidemics, infection control, random walk model, spatial model

1. 2020 年新型コロナウイルスの流行

新型コロナウイルスまたは SARS コロナウイルス-2 (SARS-CoV-2) は, 新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の原因となる SARS 関連コロナウイルス (SARSr-CoV) に属するコロナウイルスである¹⁾. 2019 年に中国湖北省武漢市付近で発生が初めて確認され²⁾, その後 COVID-19 の世界的流行 (パンデミック) を引き起こしている. 日本でも 2020 年 3 月半ば以降海外からの帰国者や感染源不明の感染者が増え, 本格的な流行が始まっている.

4 月 7 日には首都圏を中心とする 7 都府県に対し「緊急事態宣言」³⁾が発令され, 16 日夜には対象区域が全国に拡大された. 感染の拡大を防ぐため, そこでは「人と人の接触機会を 8 割削減する」ことが強く求められている. この「8 割削減」は厚生労働省のクラスター対策班に所属する北海道大学の西浦博教授らが感染症の数理モデルによるシミュレーションにもとづいて算出したものとされている. 厚生労働省新型コロナウイルス感染症対策専門家会議による「新型コロナウイルス感染症対策

の状況分析・提言」(2020 年 4 月 22 日, <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000624048.pdf>) など, 関連の報道をみる限り, ここでは感染症の短期的な流行過程を決定論的に記述する古典的なモデル方程式である SIR モデル⁴⁾をベースとした数理モデルが用いられているものと考えられる. SIR モデルにおいては一般に, 感受性保持者 S は感受性保持者 S と感染者 I の積に比例して定率で感染者 I に移行し, 感染者 I は定率で免疫保持者 R に移行すると仮定され, この時間発展は常微分方程式で記述される連続力学系として表現される. しかし現実の感染拡大は特定対象地域における二次元の空間で生じるものであり, マクロな微分方程式系の計算のみで得られた結果を直感的に理解することは容易ではない.

感染症の拡大を扱うモデル研究の中には実際の二次元空間を対象として, 人や感染源の動きを物質の水平移動・拡散に見立てて解析するセンスの研究事例⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾も存在する. たとえば Simoes⁷⁾や Fitzgibbon ら⁹⁾のように, 個々の感染者に注目した Agent Based Model (ABM) や Geographical Information Systems (GIS) Based Model を用いた研究などであるが, モデルを時間発展方程式系の形で明示

しているものは少ない。

よって本研究では、こうしたメカニズムを直感的に理解しやすい形で示すことを目的に、特定対象地域の二次元空間（地理空間）におけるランダムな人の動きをランダムウォークモデル¹⁰⁾¹¹⁾で表現し、接触する二者の間での感染を計算するモデルを構築する。またこれを用いて、現在提唱されている「8 割削減」の有効性検証を試みる。

2. 構築したモデルの構造

本研究では人同士の感染に関わる個別プロセスのミクロな評価を行うため、図-1 のようなフィールドを設定した。これは外界から孤立した正方形の島（孤島）を想定しており、10×10のグリッドのそれぞれに1人の人口（島民）を配置している。つまり、100のグリッド上において初期感染者を含む100人の島民がランダムに動きながら感染を広げていくランダムウォークモデルにより、人の動きを近似しようというアイデアである。1番から100番までの番号を付された島民は、1タイムステップごとに図-2に示されたルールでグリッド間を移動する。元のグリッドに留まるケースも含め、ここでは9つのグリッドのそれぞれに、9.00~12.25%の確率で移動するものとしている。9つのグリッドへの移動確率を均等にすることはそれぞれが11.11%となるが、ここでは東西（左右）方向および南北（上下）方向それぞれの移動について発生させた0~1の乱数をもとに決めており、0.35未満、0.65以上、0.35~0.65（移動せず）で移動を決める場合、図-2の確率分布となる。ただし境界グリッド（海岸線）において、上記パターンのうち系外グリッドに至ってしまう場合は、東西（左右）方向および南北（上下）方向のそれぞれについて、強制的に反対方向へ（壁への衝突の反作用が働いたように）動かすものとした。

初期感染者としては、図-1のほぼ中央に位置している55番の島民と、それを東西南北（上下左右）に取り巻く4つのグリッド上の島民（45番、54番、56番、65番）を設定した。以降のシミュレーションにおいては、これらの島民のうちのいずれかと同じグリッドで鉢合わせした島民は、設定された確率で接触・感染するものとしている。たとえば55番の島民は、以後の10のタイムステップを通じて図-3のような動きを見せる。

現実には感染者が発症あるいは陽性診断がなされた時点で隔離され、以後の感染は限定的なものになると考えられるため、本シミュレーションにおいても「移動の停止」や「系からの削除」を取り入れるべきとも考えられる。また、シミュレーションの対象期間を十分長くとる場合は、回復・陰性化のプロセスも考慮すべきであるが、

本シミュレーションでは最悪のシナリオを想定すべく、これらの要素を取り込んではいない。つまり、前述したSIRモデルにおけるRを表現していない。よって本研究がフォーカスしているのは、感染の流行初期ということになる。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

図-1 孤島ランダムウォークモデルにおける100名の島民（中央の5名を初期感染者とする）

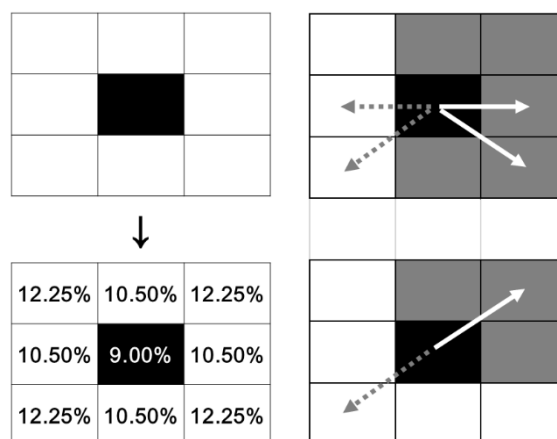


図-2 ランダムウォークにおける移動のルール（左：次のステップにおける移動確率、右：境界における反転）

またグリッド内の人口密度が十分に小さい場合、同一グリッドの内部でも島民同士の直接接触が発生しないとすれば、感染は生じない。グリッド内で実際に島民同士が接触するかどうかはサブグリッドスケールの現象として扱い、接触（感染）確率のパラメータを設定することが可能である。よって本研究では、これを島民同士の接触削減のパラメータとして読み替えている。

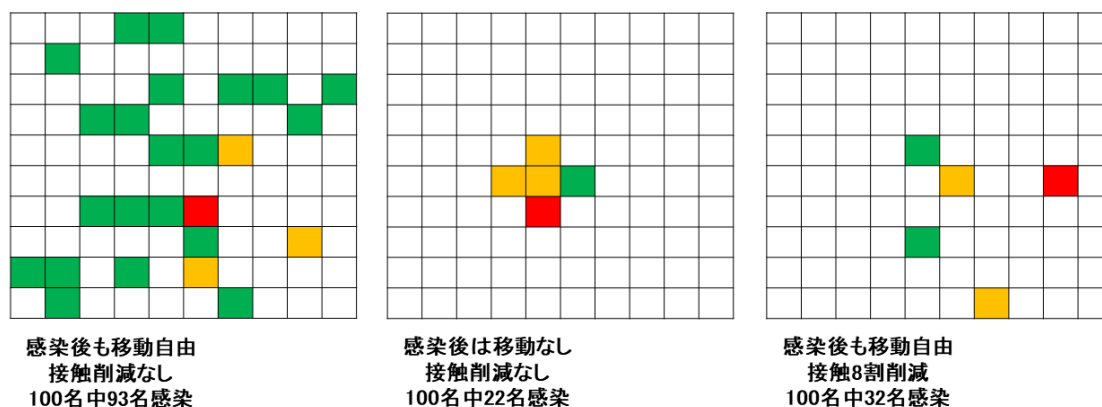


図-4 タイムステップ 10 におけるケース別の感染広域化の比較 (緑色は 2~3 名, 黄色は 4~5 名、赤色は 6 名以上)

3. シミュレーションの結果

前章でも述べたとおり, 本研究では島民同士の接触イコール (一方が感染者の場合は) 感染が発生すると仮定する.

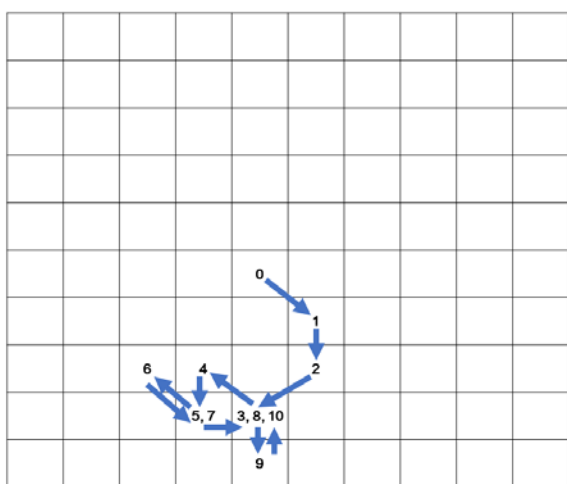


図-3 ランダムウォークのパターン (55 番島民の事例)

図-4 は, タイムステップ 10 における感染の拡大状況を, 複数のシナリオ間で比較したものである. 感染後の移動を自由とし, 接触削減も行わない場合は, 100 名中 93 名が感染することとなる. また, いくつかのグリッド (黄色もしくは赤色) では 4 名以上の感染者が存在している.

一方感染後は移動しないものとした場合, 4 名以上の感染者が存在するグリッドは生じているが, 全体の感染者数は 100 名中 22 名に留まっている.

さらに, 感染後の移動を自由としながらも, 島民同士の接触を 8 割削減した場合の感染者は, 100 名中 32 名のみとなっている.

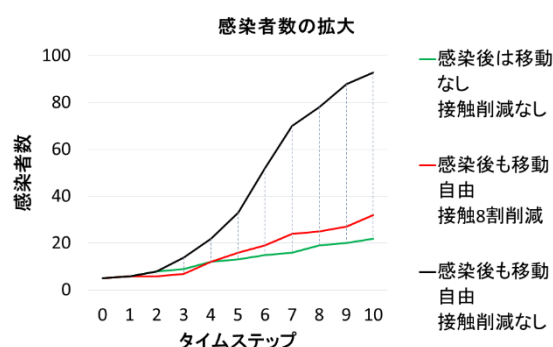


図-5 感染者数拡大のケース別比較 (初期感染者 5 名を含む)

図-5 は, タイムステップ 10 に至るまでの感染拡大を, 複数のシナリオ間で比較したものである. 接触や感染後の移動に制限を加えないケースでは, タイムステップ 3 以降で爆発的な感染拡大がみられるものの, シミュレーションの終盤では未感染者も少なくなるためか, 感染者数の伸びには頭打ちの兆候がみられる.

ここで興味深いのは, 感染後の移動に制限を加えずに接触だけを 8 割削減した場合の様子である. タイムステップ 2~3 においては, 接触を削減せずに感染後の移動に制限を加えたケースよりも, 感染者数の拡大を抑える効果がみられる.

以上より, 感染者の隔離 (移動制限) も接触の削減もともに重要であり, とりわけ移動の制限効果は大きいと判断されるが, 感染拡大期の初期においては, 接触削減の効果も顕著である可能性が示唆された.

図-6 は, タイムステップ 10 における接触削減率ごとの感染者数を比較したものである. 感染後の移動を制限しない場合, 接触を 3 割削減した段階で明瞭な効果がみられ, 5 割削減以降でその効果は顕著となっていく, 9 割削減では感染拡大をほぼ封じ込めた結果となっている.

一方感染後の移動を制限する場合は, 接触削減の効果は見えにくく, 7 割削減あたりでようやく明瞭となって

いる。

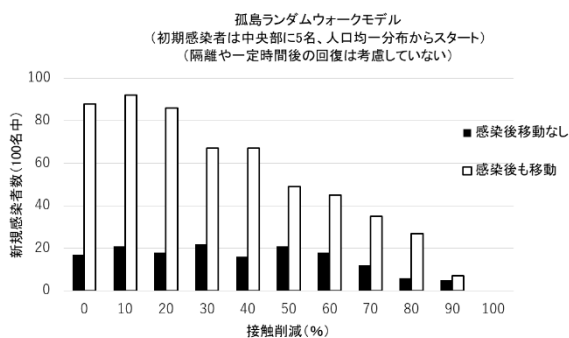


図-6 タイムステップ 10 における接触削減率ごとの感染者数の比較 (初期感染者 5 名を含まず)

なお、接触削減率が低い段階での効果が見えにくい理由としては、発生した乱数による移動の多様性により、個別グリッド内における接触よりも、同じグリッドで鉢合わせるかどうかの方が支配的になるためと考えられる。

4. まとめ

前述したように、本研究では感染後の隔離を「移動の停止」や「系からの削除」という形で表現していないので、感染後の移動ありと移動なしの 2 ケースの中間的な数値が現実のフィールドで起こりうる現象と考えるべきであろう。「8 割削減」の対象者は非感染者（および非感染自覚者）と考えられ、本研究がフォーカスしているのは感染の流行初期であることを改めて強調しておきたい。

本研究で示した時空間ランダムウォークモデルによる数値シミュレーションの結果も、異なるアプローチで導き出された「8 割削減」の合理性を支持しうるものであった。

参考文献

1) Gorbalenya, A. E., Baker, S. C., Baric, R. S., De Groot, R. J., Drosten, C., Gulyaeva, A. A., Haagmans, B. L., Lauber, C., Leontovich, A. M., Neuman, B. W., Penzar, D., Perlman, S., Poon, L. L. M., Samborskiy, D., Sidorov, I. A., Sola, I. and Ziebuhr, J.: Severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: The species and its viruses – a statement of the Coronavirus Study Group, *bioRxiv*, 2020.

(doi:10.1101/2020.02.07.937862)

2) Zhou, S. P., Yang, X. L., Wang, X. G., Hu, B., Zhang, L., Zhang, W., Si, H. R., Zhu, Y., Li, B., Huang, C. L., Chen, H. D., Chen, J., Luo, Y., Guo, H., Jiang, R. D., Liu, M. Q., Chen, Y., Shen, X. R., Wang, X., Zheng, X. S., Zhao, K., Chen, Q. J., Deng, F., Liu, L. L., Yan, B., Zhan, F. X., Wang, Y. Y., Xiao, G. F. and Shi, Z. L.: A pneumonia outbreak associated with a new coronavirus of probable bat origin, *nature*, 579, pp.270-273, 2020. (doi:10.1038/s41586-020-2012-7)

3) 新型コロナウイルス感染症緊急事態宣言 (https://corona.go.jp/news/pdf/kinkyujitai_sengen_0407.pdf), 内閣官房ホームページ (2020 年 4 月 27 日閲覧) .

4) Kermack, W. O. and McKendrick, A. G.: A contribution to the mathematical theory of epidemics, *Proc. Roy. Soc. of London, Series A* 115, 772, pp.700-721, 1927. (doi:10.1098/rspa.1927.0118)

5) Reluga, T. C., Medlock, J. and Galvani, A. P.: A model of spatial epidemic spread when individuals move within overlapping home ranges, *Bulletin of Mathematical Biology*, 68, pp.401-416, 2006. (doi:10.1007/s11538-005-9027-y)

6) Birrell, P. J., Zhang, X. S., Pebody, R. G., Gay, N. J. and De Angelis, D.: Reconstructing a spatially heterogeneous epidemic: Characterising the geographic spread of 2009 A/H1N1pdm infection in England, *Scientific Reports*, 6, 29004, 2016. (doi:10.1038/srep29004)

7) Simoes, J. M.: Spatial epidemic modelling in social networks, *AIP Conference Proceedings*, 776, 287, 2005. (doi:10.1063/1.1985395)

8) Chen, H. Y., White, D. J., Caraco, T. B. and Stratton, H. H.: Epidemic and spatial dynamics of Lyme disease in New York State, 1990-2000, *Journal of Medical Entomology*, 42(5), pp.899-908, 2005.

9) Fitzgibbon, W. E., Morgan, J. J., Webb, G. F. and Wu, Y. X.: Spatial models of vector-host epidemics with directed movement of vectors over long distances, *Mathematical Biosciences*, 312, 77-87, 2019. (doi:10.1016/j.mbs.2019.04.003)

10) 一ノ瀬俊明, 松尾友矩: 東京湾埋立計画の大気環境アセスメント ～出現風系の統計学的推定を用いて～, *衛生工学研究論文集*, 26, 79-90. 1990.

11) Ichinose, T. and Matsuo, T.: Assessment of "Tokyo New Bayland Project" for atmospheric environment by statistical method, *The 6th Scientific Assembly of the International Association of Meteorology and Atmospheric Physics, Abstracts*, 1993.

VERIFICATION OF INFECTION CONTROL BY A SPATIAL RANDOM WALK MODEL

Toshiaki ICHINOSE *, Danhe TIAN * * and Yifeng LI ***

* National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba,
Ibaraki 305-8506, Japan

** University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-0005, Japan

*** (Former Affiliation) University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba,
Ibaraki 305-0005, Japan

To stop pandemics of the 2019 novel coronavirus (COVID-19), "80 percent reduction of person to person contact opportunities" is proposed by the Japanese government. This guideline is based on the result of macroscopic differential equation model like SIR (Susceptible-Infected-Recovered) model. For the purpose of indicating person to person's infection mechanism intuitively, a new model to calculate infections between two persons who contact each other was built. This model adopts a spatial random walk model to express random movement of people in a specific 2-D space in a sense of geography. The authors applied this model to verify the effect of the proposed infection control, "80 percent reduction". The result of the numerical simulation could support a rationality of "80 percent reduction" derived by different approaches.