

仮想ウイルスの感染率が不均衡な 多次元超立方体ネットワーク内での接触検出の有効性

金子 格¹

概要：仮想社会でのシミュレーションによる接触検出アプリの効果分析について報告する。前回発表[1]においては非均一なネットワークにおいて均一なネットワークと異なる感染数の増減傾向が再現でき、接触検出の効果分析において有用なツールとなりえることを報告した。本報告では多次元超立方体ネットワーク構造の特徴を備えた最小のモデルとして3次元ネットワーク構造を用い、感染率の分布と接触検出の効果の相関を分析したのでその結果を報告する。またシミュレータは javascript で記述され web 上でデモンストレーションできるものとなっており github 上で公開したのでその使用方法も示す。

キーワード：キーワード: 非均一ネットワーク, 接触検出, 感染者数, cocoa

The effectiveness of contact detection within 3-dimensional network with unbalanced infection ratio of hypothetical virus

ITARU KANEKO^{†1}

1. 本報告の目的

本報告は前回報告[1]の続報であるが、研究の背景と動機をあらためて簡単に述べる。

2020年、covid19(新型コロナウイルス感染症)の感染防止は、日本や世界の重大課題となった。日本ではcocoa、いわゆる接触検出アプリが導入されその効果は大きな関心事である[2]。本報告ではcocoaのような接触検出の定性的な性質を、多次元超立方体構造の人工社会におけるシミュレーションによって分析した結果を報告する。

接触検出の有効性はcovid19が特有な感染特性を持つことによる。発症前から感染力が強く、発症前の数日が感染力のピークであることがわかっていて、したがって単純にPCR検査などで感染を検出して感染者を隔離しても効果が得られにくい。そのような場合にも接触追跡は効果的であると考えられる。

Cocoaの実際の効果にはもちろんCocoaの利用率、PCR検査とCocoaの連携など、様々な要因がある。Cocoaが現時点で十分機能しているか、そうでないか、といった点は本報告では論じない。架空の仮想的な社会と仮想的なウイルスによるシミュレーションにおいてCocoaのような接触検出アプリの効果が、社会の構造などのパラメータによってどう変化するか、という点を論ずることが本報告の目的である。

2. シミュレーションの前提と目的

本報告ではシミュレーションを用いて分析を行うがシミュレータに与えるパラメータは厳密に実際の疫学データや社会的な接触確率のデータには基づいていない。したがって得られた感染パターンや接触検出の効果は、現実のパラメータによって得られたものではないから、実際にそのような現象が起こりえると解釈することはできない。

一方で、社会の構造などのパラメータが、どう変化するとどう感染検出アプリの効果に影響を与えうるか、という定性的性質については有益な示唆が得られると考えている。

3. これまでの研究

Covid19の感染にかかわるシミュレーションは数多く行われている。

日本大学生産工学部はマルチエージェントシミュレーションを用いたcocoaの感染予防効果を分析した。1000人程度の人工社会をつくり、外出自粛度0~100%のエージェント(人工社会の住人)の挙動をシミュレーションした[2]。50%がアプリを利用し、感染者と接触したと知ったものが外出を半減した場合、累計感染者数が半減している。

Kretzshmar 他は接触追跡戦略における遅延の作用について、確率モデルを用いて分析している

¹ 名古屋市立大学

[3] .40%の感染が発症前に起き再生産率が1.2の場合接触追跡により再生産率を0.8に下げられるとしている。

Ahmed 等は接触追跡アプリの機能面のサーベイを行っている[4] .また15種類の攻撃手法について分析している。

理化学研究所はスパコン富岳をもちいたシミュレーションを行っている[5] .こちらは空气中を拡散する飛沫の拡散をシミュレーションするものである。

本報告の前回報告[1] では、非均一なネットワークとして3次元ネットワークを提案し、3次元ネットワーク上の感染が感染率の非均一性がある場合に複雑な挙動をすることを示した。また、接触検出アプリの効果をこの枠組みで分析できる可能性があることを報告した。

4. 不均一なネットワーク

前回報告、今回報告で用いる不均一なネットワークという概念を再度説明する。

ネットワーク構造は頂点と経路からなる構造である。感染シミュレーションにおいて個々の人はnodeとして、感染経路はedgeとして表現することができる。また感染率は edge の属性として表現できる。

図1に代表的ネットワークトポロジーを示す。(a)リングネットワーク,(b)全結合ネットワーク,(c)超格子ネットワーク

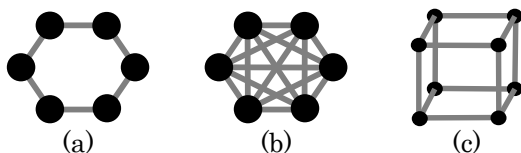


図1 均一なネットワーク

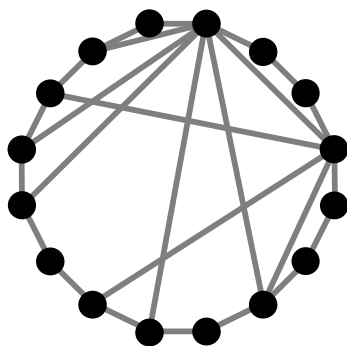


図2 Small World Network

一方、我々が関心を持つのは Small World

Network(図2)のような不均一なネットワークである。本報告では Small World Network の特性を持ちさらにパラメータを自由に可変とできる図3に示す多次元超立法体ネットワークを用いる。

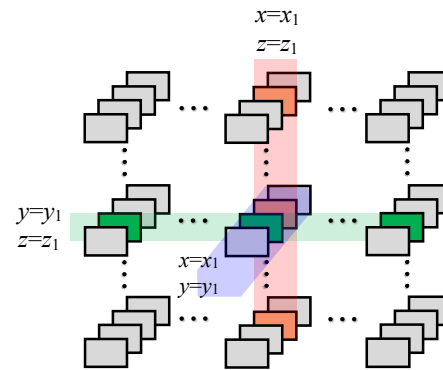


図3 3次元ネットワーク

表13 3次元ネットワークの構造

グループ名	条件	メンバー数
x グループ	$y=y_1, z=z_1$	20
y グループ	$x=x_1, z=z_1$	20
z グループ	$x=x_1, y=y_1$	4

次元が3の場合、各個人は表1に示す3つのグループに属し、各グループ内では全結合ネットワークであると考えられる。これを現実社会にたとえば各個人は所属する属性の小規模な全結合ネットワークに属することで、社会全体が結合している。たとえばxグループは職場、yグループは利用する飲食店、zグループは家庭内のネットワークを模倣したものとすると、各グループは全結合しているが社会全体はそうではなく、また感染率はグループ毎に異なる、という状況を模倣している。

5. 実験

5.1. TDSWNS 感染シミュレータ

このような3次元格子の仮想社会のシミュレータを以下では TDSWNS(Three Dimensional Small World Network Simulator)と呼ぶこととする。今回開発した TDSWNS の実行画面を図4に示す。JavaScript で実装され Web ブラウザ上で動作する。2つの canvas を表示し第1のキャンバスには感染状況の3次元表示を、第2のキャンバスには感染者数(感染可能な人口)の時間的な推移が示される。

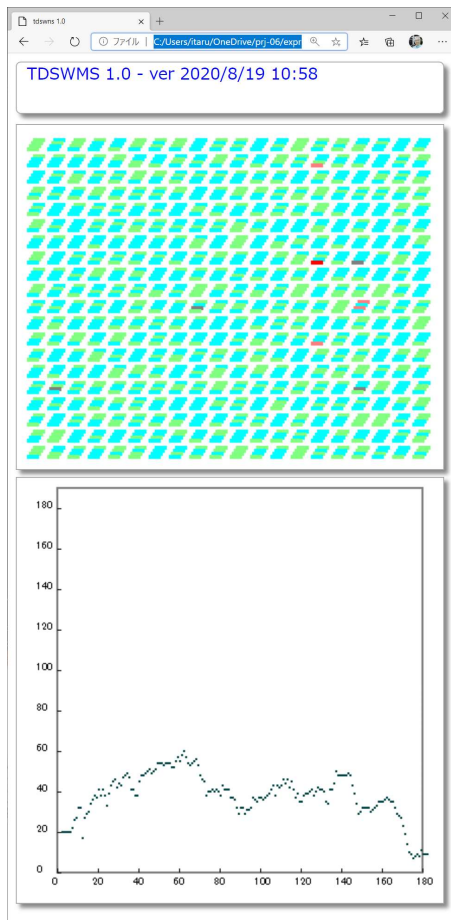


図 4 TDSWMS 感染シミュレータ. $r_0=1.0$ で感染率が均等の場合を示す

5.2. 仮想社会上的接触検出の効果

シミュレータ上で接触検出の効果を模倣するには感染のメカニズムを過程する必要がある. そこで Kretzshmar[3] のモデルに倣い, 感染者が感染後どのようにウイルスを放出し, どのようなタイミングで他の感染者に感染させるかを図 5, 表 2 のように仮定した. この挙動はシミュレーション上のものであり, 現実のウイルスの挙動とは日数などが異なると考えられるが, 本報告で論ずる定性的な特徴には, 大きな影響はないと考えられる.

つぎに接触検出は図 6 のようなメカニズムで効果を発揮すると仮定した. 感染者 a が感染した後破線は潜伏期, 実線は感染可能な期間をあらわすが発症は c の 8 日目となる. 常時検査をしても感染可能期間開始後 3 日程度のタイムラグがあり検査の陽性が本人に通知されるのは 8 日目の c の時点であり, 陽性者をただちに隔離しても b に示すようにこの期間に多数の感染者が発生する. 接触検出アプリはこれらの接触者をさかのぼって調べ, d に示すように感染可能となる以前に隔離することにより a からの感染者 b からさらに感染

することを抑止できる.

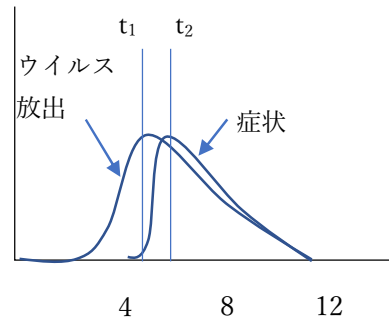


図 5 ウイルス放出, 発症, 治癒までの時間の推移(架空のウイルス)

表 2 感染後の挙動(モデル上の架空のウイルス)

日数	感染者の挙動
0 日目	感染確率にしたがって感染
1~4 日目	潜伏期
5~8 日目	非発症の感染可能期間
9~11 日	発症後の感染期間
12 日	回復

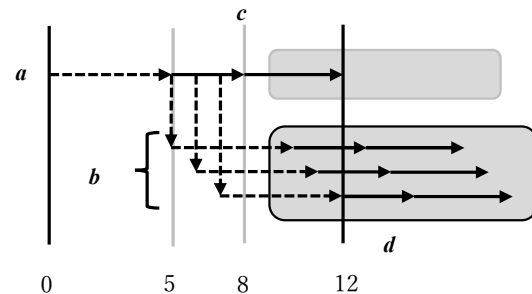


図 6 接触検出の効果(架空のウイルス)

シミュレーション上の接触検出アプリの効果はもし a, b 両方が接触追跡アプリを利用していれば b からの感染がおこらないという効果としてあらわした.

5.3. モデルのパラメータ

本モデルでは様々な社会の構造をパラメータとして与えることができる. たとえば感染率は x, y, z のグループ毎に任意に与えることができる. たとえば x 軸, y 軸, z 軸に異なる感染率を割り当てることもできる. 図 7 に感染率 0.0044 均等 ($r_0=1.2$ 相当)

図 8 に $r_x=0.0074, r_y=0.0014, r_z=0.0044$ の場合を示す. これは初期状態の再生産率は 1.2 であ

るが同じ $r_0=1.2$ の図 7 と比較すると似ているのは最初の 20 日間だけでそのあとは大きく挙動が変わることが示されている..

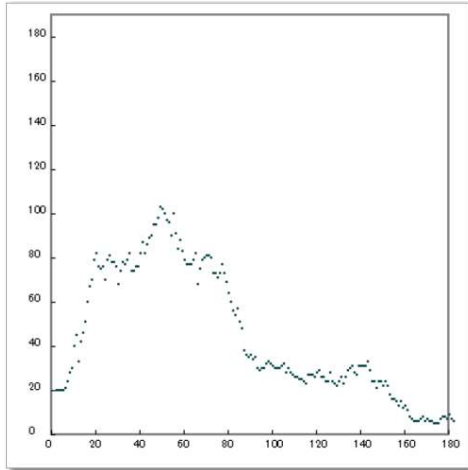


図 7 TDSWN 感染シミュレータ. 感染率が 0.0044 ($r_0=1.2$) で均等の場合を示す

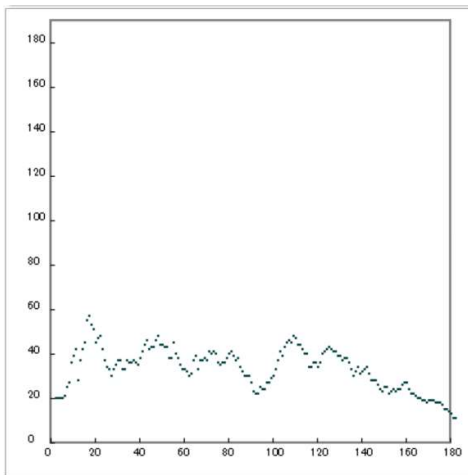


図 8 TDSWN 感染シミュレータ. 感染率が $r_x=0.074, r_y=0.014, r_z=0.044(r_0=1.2)$ の場合

これによりたとえば飲食店などがすべて一定の r_0 という感染率を持つ場合、あるいは 90%の飲食店が感染率 r_1 で 10%の飲食店が感染率 r_2 という場合などをモデル化することができる。

本報告のテーマはたとえばそのように一部のグループが感染を広めている場合に、たとえばそれ以外の飲食店の利用者だけが接触検出アプリを使った場合にどのような効果が期待できるか、という点である。

6. インストール率と効果

インストール率は感染防止効果にどのように影響するだろうか。インストール率 0%, 30%, 70%で比較した(図 9, 図 10, 図 11). 一時イン

ストール率が一定の率に達しないと効果が出ないという懸念が広がったが本当だろうか。

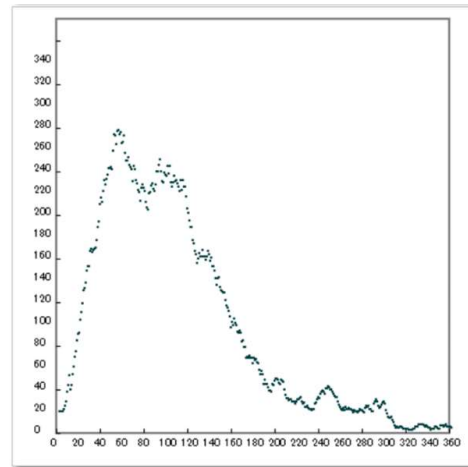


図 9 アプリインストール率が 0%

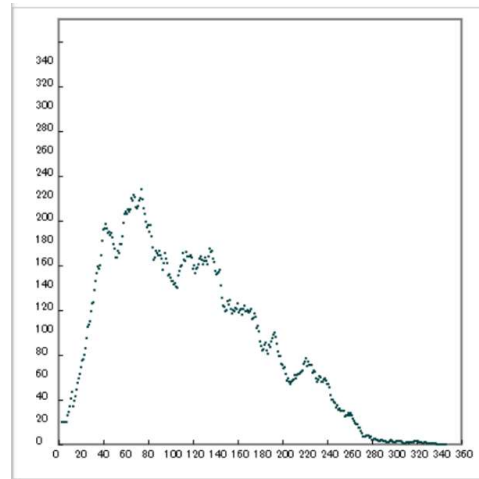


図 10 アプリインストール率が 30%

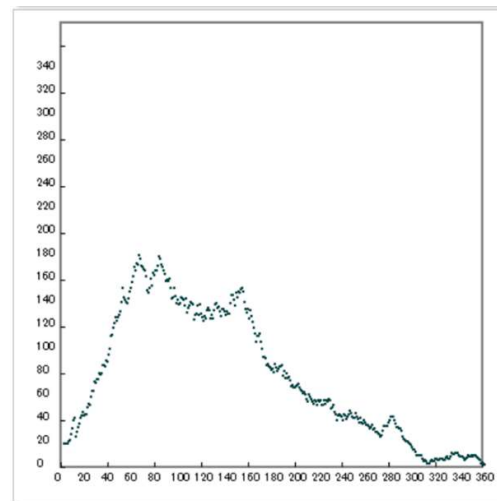


図 11 アプリインストール率が 70%

シミュレーション上ではそのような閾値は無

く、インストール率に比例して効果があることが見て取れる。

7. 利用するグループによる効果

次に、たとえば特定のグループにアプリを利用させた場合について試みてみたが、この結果は興味深い。

感染率が高いグループと低いグループがある場合に、感染率の低いグループでだけアプリを利用した場合図 12、感染率の高いグループでだけアプリを利用した場合図 13 を比較した。シミュレーションによれば前者の方が効果が高い結果となった。これは意外かもしれない。

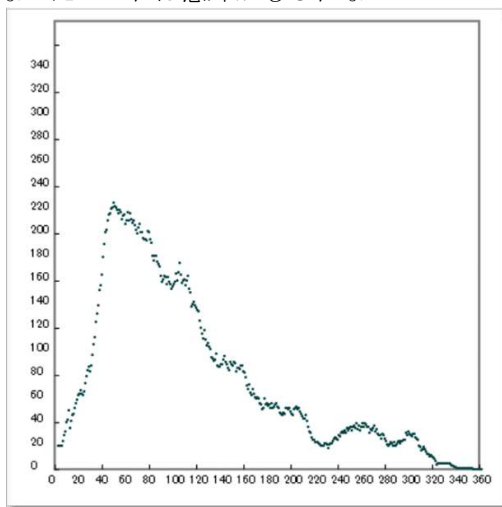


図 12 低感染率のグループのみが利用

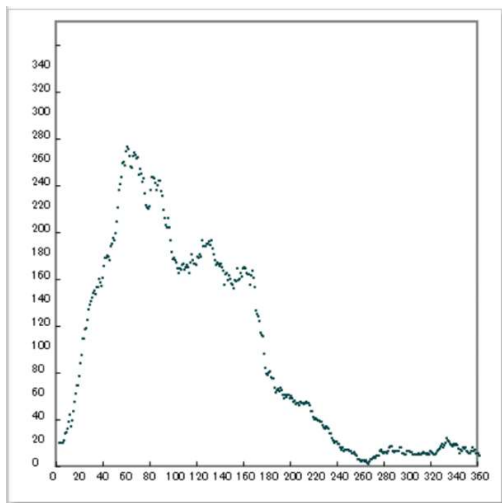


図 13 高感染率のグループのみが利用

さらに、まったくアプリを使わなかった場合やすべての人が使った場合も含め、シミュレーションで得られた感染防止の効果を表 3 にまとめた。低感染率のグループだけがアプリを利用しても、

全員がアプリを利用した場合に近い効果が得られた。

この理由は確認できていない。しかし、シミュレーションにおいて高感染率のグループ内では全結合したグループメンバー内で比較的短期間に感染が広まってしまう。このことが、こう感染率のグループで接触検出アプリの効果が低いという結果に結び付いていると推測できる。したがって、このシミュレーションの条件では、感染率が低くあまり感染しないが、そのグループに属する総人口は多いというグループでアプリを利用することが推奨される。

なお PCR 検査が濃厚接触者の自主隔離により効果の大部分を発揮しているとすれば、やはり同様に、感染が少ないグループにおいて発熱などをした人を PCR 検査することが、より高い効果につながる可能性を示唆している。しかしこの点については興味深い根拠は十分ではないから、今後の課題としたい。

表 3 アプリの利用と効果(減少率=%)

		感染率の高いグループ	
		使う	使わない
感染率の低いグループ	使う	35%	22%
	使わない	なし	なし

8. ソースコード

本シミュレーションは JavaScript 上で実装している。ソースコードとドキュメントを github で公開した。整備中ではあるが自由に利用していただいてもかまわない[6]

9. まとめ

本報告では多次元超立方体ネットワークによる人工社会における感染シミュレータを用い、非均一なネットワーク内の接触検出アプリの効果の定性的な性質を確認した結果を示した。シミュレータ、TDSWNS を JavaScript で開発し各種条件でシミュレーションを行った結果、シミュレータ上ではアプリのインストール率と効果には明確な閾値はなくインストール率に比例して効果が高まることが確認できた。また感染率に高低差がある場合、感染率が高いグループでアプリを利用するよりも、感染率が低いグループで利用する方が、アプリの効果が高いという結果が得られた。

ここでシミュレーションに用いた多次元超立方体ネットワークはこのようにネットワークの不均一性の中での接触検出アプリの効果について様々な定性的性質を調べるのに有益であると考えられる。

また本報告では JavaScript によるシミュレータを用いた。JavaScript による実装は Web ブラウザ上でシミュレーションでき結果をビジュアルに示すために有用であるが計算能力は低いためモデルも単純で人口も少ない。今後高速大規模演算が可能な実装にすることで、より実際に近いシミュレーションを実装する計画である。

現実の covid19 感染では、ワクチンの大量投入により感染が収束すると期待されている。しかし免疫の持続性や副反応は未知数である。感染者数が減少すればワクチンのコストやリスクの重みが感染リスクとくらべ相対的に上昇し、ワクチンを接種しない人口が増加し、再び感染が広がるという繰り返しになる可能性がある。そのような場合に、副作用なく一旦インストールすればアンインストールしない限りは効果が持続する接触検出アプリはワクチンの効果を補完する役割を担うことが期待されるかもしれない。

そのような感染の繰り返しはない方がよいかから、本報告が役立たないことを願う。

参考文献:

- [1] 金子格, 非均一ネットワーク内の感染検出システムの有効性, 情報処理学会 研究報告 2020-EIP-89, No.14(2020)
- [2] 大前佑斗, 豊谷 純, 原 一之, 権 寧博, 高橋弘毅, マルチエージェントシミュレーションによる COVID-19 接触確認アプリ COCOA の感染者数削減効果の検証, 信学技報, 2020-09-LOIS-EMM-IE-CMN-ME-AVM
- [3] Mirjam E Kretzschmar, Ganna Rozhnova, Martin C J Bootsma, Michiel van Boven, fJanneke H H M van de Wijkert, Marc J M bonten; Impact of delays on effectiveness of contact tracing strategies for COVID-19: a modelling study; The lancet public health, vol. 5, issue 8, Aug 2020
- [4] Nadeem Ahmed, Regio A. Michelin, Wanli Xue, Sushmita Ruj, Robert Malaney, Salil S. Kanhere, Aruna Seneviratne, Wen Hu, Helge Janicke, Sanjay K. Jha, A Survey of COVID-19 Contact Tracing Apps, IEEE access, vol 8 (2020)
- [5] 坪倉 誠, スパコン「富岳」によるウイルス飛沫・エアロゾルのシミュレーション, 情報処理学会誌, Vol. 62, No. 2, p64-66(2021)
- [6] Github リポジトリ(ドキュメント準備中), <https://github.com/ItaruKaneke/v3d-infectionsim>