

非均一ネットワーク内の感染検出システムの有効性

金子 格†

概要:

ウイルスなどの感染力をもったエージェントの拡散については多くの研究がある。感染確率や感染した後の時間的なふるまいを用いて、感染数の変化をシミュレーションにより求めることができる。また感染確率(再生産率)によって全体的な感染の推移が決まることもよく知られている。

しかし実際の感染者数の推移は、多くの変数によって影響を受ける。特に感染したエージェントの検出と隔離をもなう場合や、各エージェントがいくつかのタイプにわかれる場合などにおいてどのような影響があるかは現在関心をもって検討されている課題である。

最近になって、新型コロナウイルス感染症(covid19)の対策として導入された **cocoa**(接触検出アプリ)の効果については様々な議論がされている。こうした情報技術を用いた接触検出アプリケーションを併用した場合の感染抑制効果は、もとより対象となる集団のさまざまな特徴に大きく依存する。このようなシミュレーションについてもすでにいくつかの研究報告があるが、すでに明らかな点と、まだ未検証の点がある。

本報告は仮想空間上の架空のウイルスを題材として、特にネットワークの空間的特徴と、エージェントの特徴に着目して、どのようなパラメータがシステムの有効性に影響を与えるのかについて考察を加える。

キーワード: 非均一ネットワーク, 接触検出, 感染者数, cocoa

1. 接触検出アプリケーションへの関心

最初に、以下では研究の背景として covid 19 に言及するが、本研究の実験はいかなる意味でも covid19 の医学的データを用いたり、それに対する知見を与えようとするものではない。本報告の趣旨はあくまで架空のウイルスの拡散の感染検出アプリの挙動においてネットワーク構造がどう影響するかを調査するという点にある。本研究に示された実験結果は架空の設定によるもので、実在のウイルスへのふるまいではないので注意してほしい。

2020 年, covid19(新型コロナウイルス感染症)の感染拡大とその防止は、日本と世界の重大な課題となった。その中で情報技術を用いた感染対策にも一定の効果があることが注目され、日本では **cocoa** と呼ばれるアプリケーションが導入された。**cocoa** はいわゆる接触検出アプリケーションであり人々がだれと接触したかという情報を検出、記録し、大きな感染抑制効果があるといわれている[1]。

接触検出が有効と考えられるのは, covid19 の感染の特性による。covid19 は感染後免疫系に作用し、ウイルスの増殖時に発症を遅らせ、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。つまり発症した後、あるいは PCR 検査を数日おきにして検査が陽性になってすぐに隔離

措置を行っても、それまでに多くの新たな感染者を発生させ得るので感染防止効果が限定的になる。

この問題を解決する第 1 の手段としては社会的に接触そのものを抑制し、PCR 検査で陽性となった感染者が過去数日に接触したと考えられる人をすべて本人の行動記録から探り隔離するという方法がとられる。しかし本人の行動記録は得られても周囲にだれがいたかはわからないから、この方法では宴会や公共施設など、接触者があとからわかる場合にしか感染のチェックの範囲を広げることができず、経路不明の感染が増える要因となる。

第 2 の手段が **cocoa** である。PCR 検査後、検査で陽性になった感染者が過去数日に接触した人すべてを一旦「隔離」することで二次感染を防げる。検査の時間的な穴をふさげるのである。

このように接触検出と PCR 検査は車の両輪となって感染をくいとめることが可能となる、きわめて強力な感染防止のツールである。もちろん **cocoa** の利用率、そして PCR 検査と **cocoa** の連携など様々な要因がある。このシステムが現時点で十分機能しているか、そうでないとして将来望ましい状態で稼働するのかは本報告では検討しない。本報告ではもっぱら **cocoa** のようなアプリケーションが集団の一部に使われた場合にどのよ

† 名古屋市立大学
Nagoya City University

うな効果を発揮できるか、という点を考察する。

2. これまでの研究

このようなウイルスや接触検出ソフトの挙動は様々な方法で理論的に分析されている。しかし、cocoa は情報技術を用いたツールであるため、情報システムの作用も含めて分析するのであれば、ウイルスを含めてエージェントシミュレーションを用いて分析する方法も候補となる。

ウイルスや感染する集団のシミュレーションは多くの先行研究があるが、感染確率や感染した後の時間的なふるまいを用いて、感染数の変化をシミュレーションにより求めることができることはよく知られている。また感染確率(再生産率)によって全体的な感染の推移が決まることもよく知られている。

しかし実際の感染者数の推移は、社会の構造や行動パターンによって影響を受ける。特に感染したエージェントの検出と隔離をとまなう場合や、各エージェントがいくつかのタイプにわかれる場合などにおいてどのような影響があるかは現在関心をもって検討されている課題である。そして感染者がどのような行動をとるかは個人によって大きくことなるから、そうした行動の影響を忠実に再現するならば、均一なネットワークではなく不均一なネットワークにおける挙動も調べるべきだろう。

エージェントシミュレーションを用いた不均一なネットワークでの接触検出アプリを含む集団への感染のシミュレーションにどのような先行研究があるかをまず確認してみよう。

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[2]。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。確率モデルは用いているが空間時間的に不均質な場合については論じていない。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[3]。また 15 種類の攻撃手法について分析している。接触追跡アプリの効果についての分析はしていない。

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[1]。

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するとしている。しかし住民相互の接触機会が不均一な場合やどの住民のアプリ利用が効果

的であるかという分析はまだ行われていないようである(実験は継続中であるため、すでに行っている可能性もある)。

このようにこれまでに行われた効果の分析においては、空間時間的に不均質なネットワークについてその不均一性がどう影響するかについては十分な分析がされていないと考えられる。

もちろん現実のネットワーク(人と人とのつながりや挙動)がわからないのだから、現実の社会お不均一性をモデルで再現することは難しい。しかし、ネットワークの不均一性がどう効果に影響するか、どの程度影響するかという点を確認できれば、結果の信頼性を確認することにも役立つし、ネットワークのどのような部分に重点的に対策を講じれば効果があがるかという点にも示唆が得られるだろう。そのような期待が持てることから、報告者は、たとえ架空のものであっても不均一なネットワークにおけるエージェントモデルの挙動を分析することは有益だと考える。

3. 不均一なネットワーク

それでは本報告で検討する不均一なネットワークにはどのような種類のものがあるだろうか。ネットワーク構造は頂点と経路からなる構造である。

均一なネットワークの条件としてすべての頂点が相似であることがあげられるだろう。つまりどの頂点をとっても差がないものである。

図 1 に様々なネットワーク構造の中で全頂点が等価なものを示す。(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はすべての頂点が等価である。

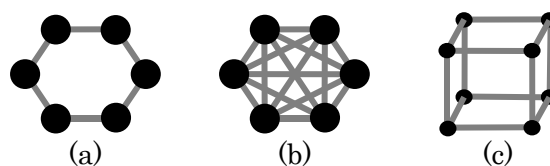


図 1 均一なネットワーク

これに対し、我々が関心を持つのは経路が不均一であるか、あるいは経路に与えられたパラメータが不均一なネットワークである。まず経路が不均一なネットワークの代表的なものは Small World Network(図 2)である。この構造は経路が均一でないという点で実社会の構造に近い構造とされている。

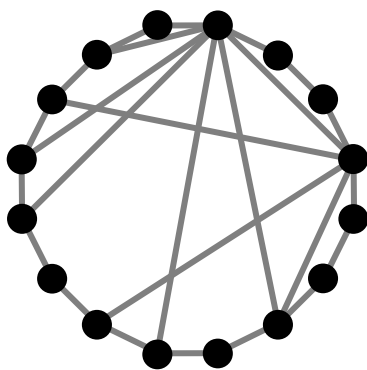


図 2 Small World Network

Small World Network は任意の 2 つの頂点の距離がネットワーク中の頂点数の対数に比例するような特徴を持つものと定義されている。

$$L \propto \log N \quad (\text{式 1})$$

この関係では頂点数が増えた場合に接続が均一なネットワークほどは増えていかないことを表すが、現実の社会の人と人の接触に近いと考えられる。

そのような性質を持ちさらに興味深いネットワーク構造の一例として、本報告では図 3 に示す 3 次元ネットワークを考える。このネットワークでは各個人は表 1 に示す 3 つのグループに属する。各グループ内では全結合ネットワークが形成されている。

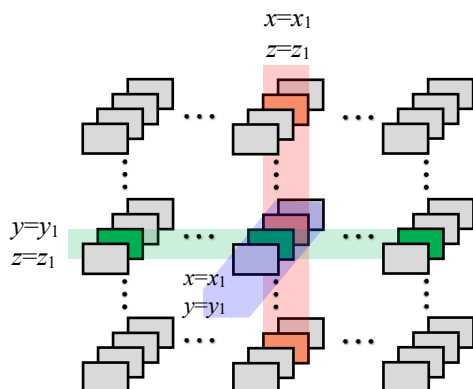


図 3 3次元ネットワーク

表 1 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	$x=x_1, z=z_1$	20
y グループ	$y=y_1, z=z_1$	20
z グループ	$x=x_1, y=y_1$	4

この構造は、現実のネットワークを忠実に模倣したものではない。しかし各個人がそれぞれいくつかのグループに所属しており、それぞれのグループ内では全結合に近い接触があり、グループ間の接触は少ない、という構造は社会にもみられる。社会のネットワーク構造をごく単純化した模倣になると考えている。たとえば x グループは学校のクラス y グループは交友関係、 z グループは家庭内のネットワークを代表している。各個人は複数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も結合しているが社会全体はかならずしも全結合ネットワークではない。

4. 実験

4.1. TDSWNS 感染シミュレータ

このような仮想社会のシミュレータを開発した。以下 TDSWNS(Three Dimensional Small World Network Simulator)と呼ぶこととする。

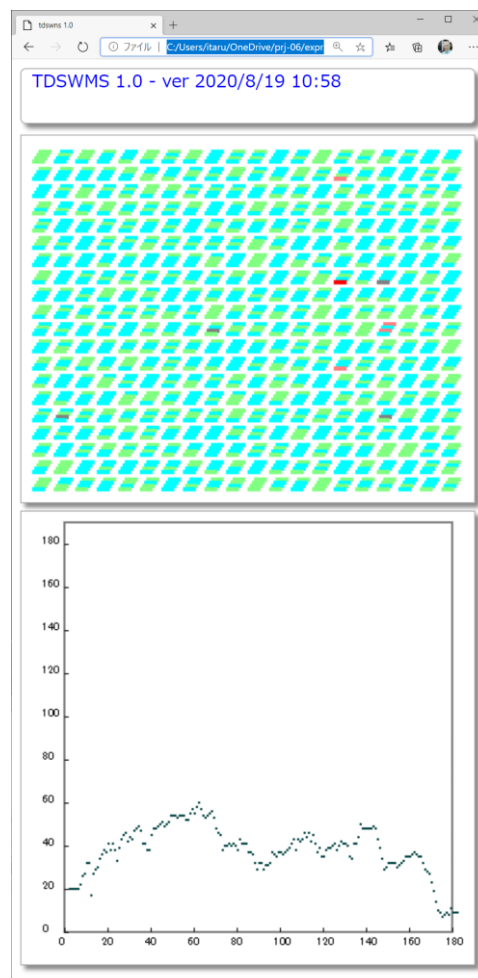


図 4 TDSWNS 感染シミュレータ. $r_0=1.0$ で感染率が均等の場合を示す

TDSWNS の実行画面を図 4 に示す。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.

4.2. 仮想社会上の架空ウイルスの挙動

感染後のウイルスの挙動は表 2 のように設定した. ただしこの挙動は現実のウイルスに関するものではなく, 架空のものである. 現実のウイルスについてもこのような挙動をするものがあるが, 感染後の日数などは正確には特定しにくいことも多い. 本報告の目的はネットワーク構造と感染の関係を探るものである, 架空のウイルスがこのような挙動をすると設定した.

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

各グループ内は全結合で, メンバーはグループ内の他のすべてのメンバーとの接触がある. 接触数は $19+19+3=42$ で, 感染期間は 6 日間である. このすべての接触の感染確率 0.004 で 1 人の感染者が平均的に感染させる感染者数がだいたい 1, つまり $r_0=1.0$ となる.

4.3. 均等な分布の挙動

初期状態で感染者が均等に 20 人分布し, 感染率が 0.004($r_0=1.0$)で均等である場合の感染の推移は先に示した図 4 のようになる. この場合感染者はもともと均等に分布しているためネットワークが不均一である点はあまり影響せず, TDSWNS でも感染者数が安定することが確認できる.

図 5 に感染率が 0.006 の場合($r_0=1.5$), 図 6 に感染率 0.0044 均等 ($r_0=1.2$ 相当), 図 7 感染率が 0.0036 で ($r_0=0.8$)である場合を示す. $r_0>1$ では感染率が 2 割異なってもピークはあまり変わらない. ピークを抑えるには $r_0<0$ であることが重要であることが確認できる.

いずれの場合も若干のゆらぎはあるが全体としてはほぼ均等なネットワークと同様の挙動がみられる. 感染率が均等であればネットワークが均等でなくても, 全体的に感染者数が増えていくため, モデルの挙動は均等なネットワークと変わらないと考えられる..

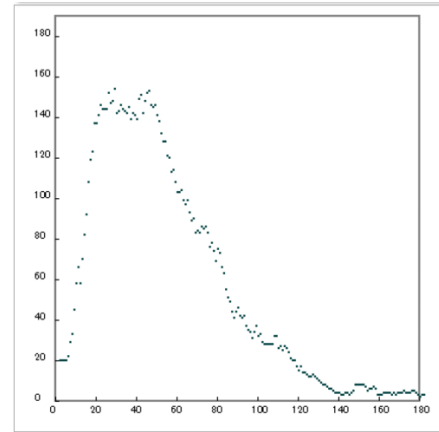


図 5 TDSWN 感染シミュレータ.感染率が 0.006($r_0=1.5$)で均等の場合を示す

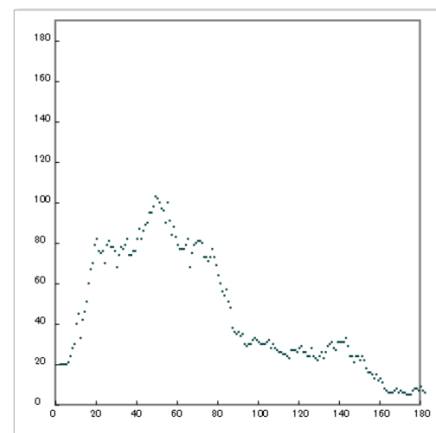


図 6 TDSWN 感染シミュレータ.感染率が 0.0044($r_0=1.2$)で均等の場合を示す

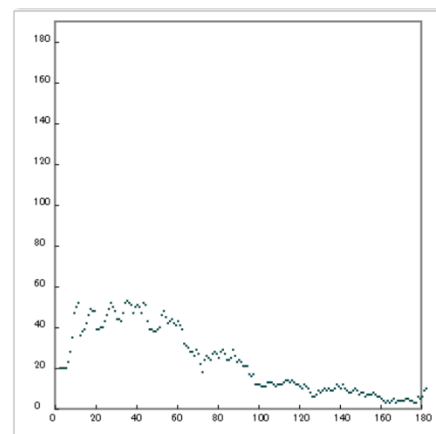


図 7 TDSWN 感染シミュレータ. 感染率が $r_x=0.036, r_y=0.036, r_z=0.036(r_0=0.8)$ の場合

4.4. R_x と r_y が異なる場合の挙動

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 6 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. 全体に感染が抑えられる傾向にあり, また途中何度も感染のぶり返し

がおきている。

この場合グループ x では感染爆発がおこりやすくグループ y の内部では感染が伝わりにくい。グループ x は一人でも感染者がいればすぐに感染が爆発的に増え多数の感染者が感染力を持っている間にそれがグループ y を伝わって別のグループ x に伝わるという挙動をしていると想像される。そのためいくつもの感染のピークが生じる。

図 9 にさらに rz も相対的に大きくした場合を示す。この場合 y - z 面ではそれぞれ感染がおきやすく x 方向のみ感染がおきにくいことになるが、挙動は図 6 とよく似ている。つまり挙動が変わるのは感染が 1 次元に押しとどめられた場合であり 2 次元で感染がおきると 1 次元だけの感染を防止してもあまり効果がない。

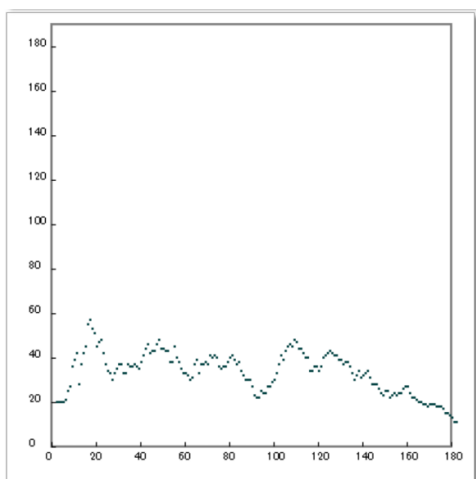


図 8 TDSWN 感染シミュレータ. 感染率が $rx=0.074$, $ry=0.014$, $rz=0.044$ ($r_0=1.2$) の場合

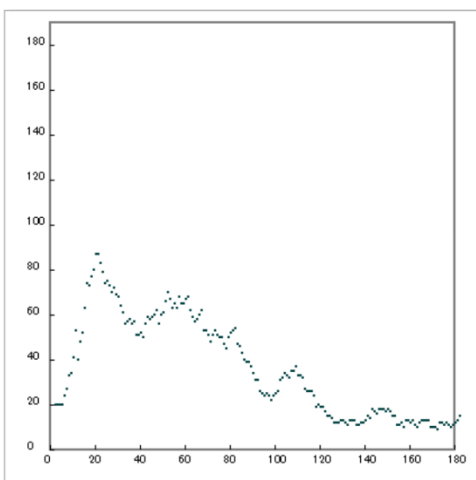


図 9 TDSWN 感染シミュレータ. 感染率が $rx=0.077$, $ry=0.014$, $rz=0.067$ ($r_0=1.2$) の場合

図 10 に ry , rz とも小さい場合を示す。この場

合も x 方向にしか感染が広がらないから初期の増大をすぎれば感染は抑えられる。図 11 は興味深い。 z 方向はメンバーが 4 であるためこのグループ内での感染防止はあまり効果がないようにも思えるがここでは z 方向の感染を小さく抑えた結果を示している。図 6 の場合とくらべ感染の抑制効果はかなりあることがわかる。つまり 3 次元ネットワークの短い辺にそった感染を抑えるのは長い辺にそった感染防止と同等の効果があることが示唆され、興味深い結果ではなかろうか。

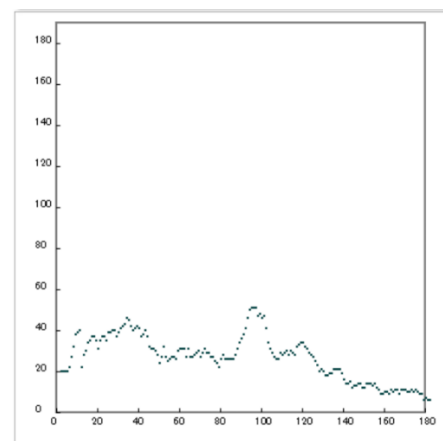


図 10 TDSWN 感染シミュレータ. 感染率が $rx=0.077$, $ry=0.017$, $rz=0.016$ ($r_0=1.2$) の場合

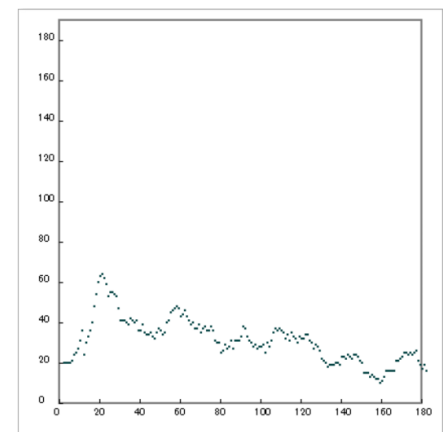


図 11 TDSWN 感染シミュレータ. 感染率が $rx=0.051$, $ry=0.044$, $rz=0.006$ ($r_0=1.2$) の場合

4.5. 接触検出の効果

次に接触検出の効果について考える。接触検出は以下のメカニズムで感染検査との相乗効果で感染を抑止すると考えられる。

図 12 に仮想空間上の架空のウイルスに感染した場合のウイルスの放出、発症の変化を示す。このウイルスは発症前にウイルスの放出のピークを生じることが特徴である。したがって発症後すぐに療養してもそれまでに接触したものに感染

させてしまう．発症にかかわらず検査をすることによりこの発症前の感染を若干減らすことが可能であるが，その検査を3日毎に行ったとしてもやはり検査結果を得て本人を説得するまでには平均3日程度を要すると考えられる．したがって定期的にPCR検査を行い，隔離を実行するタイミング t_1 と，発症してから自宅療養をした場合のタイミング t_2 はタイミングに大きな差がない．いずれの場合も隔離前の接触による感染の広がりをどう抑制するかが課題となる．

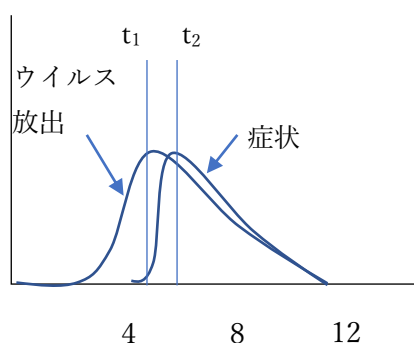


図 12 ウイルス放出，発症，治癒までの時間の推移(架空のウイルス)

そこでこのようなウイルスには接触検出の併用が有効と考えられている．接触検出がどう感染を防止するかを図 13 で示す．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日目とした．また常時検査をしてもやはり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 の時点と考えられる．したがって 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隔離で， 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．

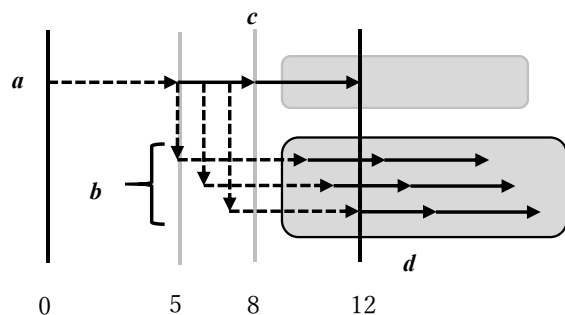


図 13 接触検出の効果(架空のウイルス)

シミュレーション上は，この効果はもし 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すことができる．先のシミュレーションにおいて人々の接触のネットワークの構造が感染の広がり大きく影響することが確認されたので，おそらく接触検出の利用状況もそれがどこで使われるかによって大きく効果は異なると推測される．

本シミュレータによってそのようなシミュレーションを行った結果は，発表時に報告する予定である．

5. まとめ

本報告では非均一なネットワーク内の感染検出システムの有効性について論じた．非均一なネットワークとして3次元構造をもちグループ内では全結合を持つ Small World Network を想定した．そのシミュレータ，TDSWNS を JavaScript で開発し各種条件でシミュレーションを行うことを可能とした．各グループの感染率が均等であれば不均一ネットワークの効果は少ないが，感染率が不均等でかつネットワークが不均一であると感染の広がり方は大きくことなることがわかった．接触検出アプリの効果についても本シミュレータ上で検証する準備が整った．検証結果については発表で報告する予定である．

なお本報告にあげるウイルスおよび人工社会は架空の設定によるもので実在のウイルスの挙動を分析するものではない．

References:

- [1] 大前佑斗・豊谷 純・原 一之・權 寧博 (日大)・高橋弘毅 (東京都市大)，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
- [2] 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
- [3] 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)