

新型コロナウイルス感染デジタルツインによる最適施策選定

- 感染拡大防止と経済活動維持の両立へと向けて -

東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 准教授
株) MinD in a Device 技術顧問
渡辺正峰

新型コロナウイルスの感染拡大防止策を模索する上で、①感染状況の全容把握と②施策の効果の予見性が求められています。本提案では、濃厚接触グループの多次元（例：家族、職場、公共交通機関）・多階層性（例：社内の室、係、課、部）などを考慮した高精度の感染状況のデジタルツイン（電子仮想世界の双子：社会感染シミュレーションと複雑な検査過程を統合したもの）を構築し、それを深層学習を用いて実社会と同化することにより、①、②ともに高いレベルで実現することを目指します。

予備的な解析の結果、通勤電車の乗車時刻と乗車位置を各人が固定することにより感染爆発を防ぐことができるなどの結果を得ています。

背景と目的

上記①、②を日本の現状に即した問題としてとらえたとき、以下に示すような技術的・学術的な課題が浮かび上がります。

①の全容把握については、PCR検査や抗体検査の絶対数が少ないことに加え、検査へと至る過程の特殊性から検査対象者に偏りが生じていることが問題となります。具体的には、日本独自の検査プロセス（医師の要請による症状が顕在化した患者の検査；クラスター対策班による新規感染クラスターの検査）により、陽性者割合は無作為抽出検査と比べて大きく上振れし、その度合は今後の感染状況によって変化していくことが予想されます。そのため、検査数と人口の比で単純に検査結果を補正するだけでは感染状況の全容把握には結びつきません。

一方、②の施策の効果の予見性については、これを叶えるべく社会感染シミュレーションが運用されています。しかしながら、それぞれの地域に即したきめ細やかな施策の効果を推し量るためには、地域固有の社会的属性をシミュレーションに織り込む必要があり、問題は、そのような高度なシミュレーションを、前述の如く偏りのある部分観測から、実社会の感染状況に同化させる手法が確立していないことです。

そこで本提案では、高度な感染シミュレーションと実情に即した検査過程を統合して一つのデジタルツイン（電子仮想世界の双子）として扱い、それを深層学習を用いて実社会と同化させることで、①、②ともに高い精度で実現可能なシステムを開発します。接触の八割減が叫ばれるなか、その達成に向けてのさらなる施策の検討もさることながら、ワクチン接種や集団免疫獲得が完全に実現するまでの長きに渡る過渡期において、それらの達成度合いを考慮に入れた段階的の自粛解除の検討などに大きな力を発揮するものと考えています。

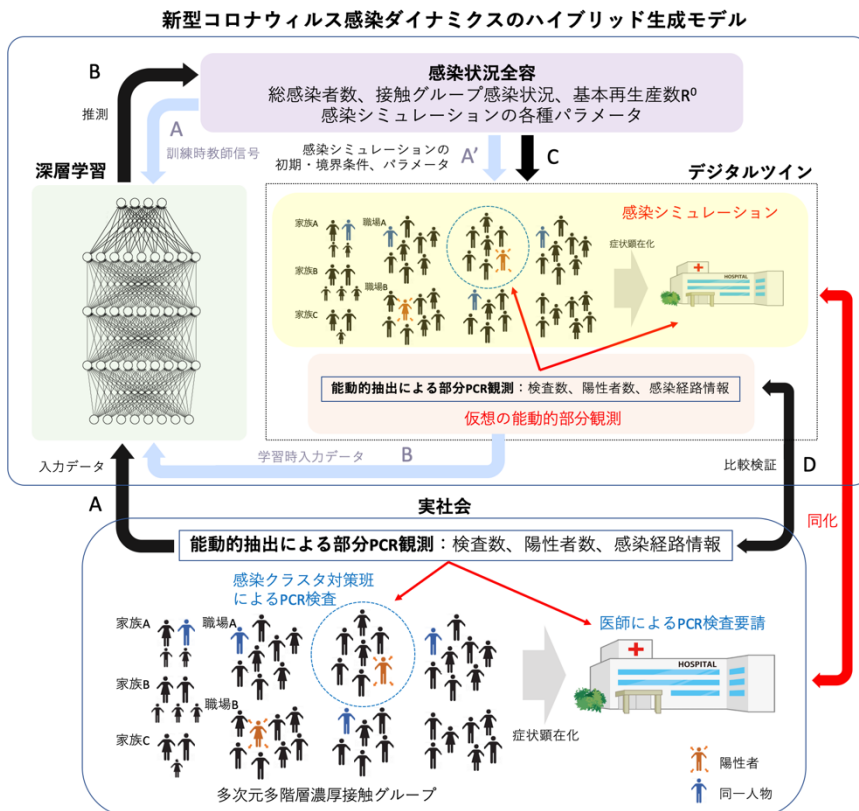


図1 新型コロナウイルス感染ダイナミクスのハイブリッド生成モデル

本文中①の感染状況の全容把握は、黒矢印のA→Bの流れで行われます。一方、②の施策の効果予見については、さらに黒矢印Cで感染シミュレーションを実社会に同化させた後に、施策を仮想世界の平行ワールドの要領で適用し（例：電車の乗り位置を固定）、その後の時間発展を比較検討することによって得ます（図2a参照）。本システムのもう一つの特徴は、深層学習の訓練が青矢印のA、A'→Bで行われ、システム内部で完結することです。実社会の感染プロセスが感染シミュレーションの中に包含され、

システム概要

提案システムは、デジタルツインと深層学習モデルの二つのモジュールからなり、それらが相互作用することで上記①、②を高いレベルで実現します。

デジタルツイン（図1中段右）は実社会の感染状況と検査過程を計算機上に再現したものであり、感染シミュレーションと仮定の能動的部分観測からなります。一方で、深層学習モデル（図1中段左）は、PCRの検査結果（検査数、陽性者割合、感染経路情報等）を入力として受け取り、感染状況の全容を出力します。（深層学習の訓練法については図1キャプション参照）。

重要なポイントは、ここで推測された感染状況全容が、①の要求に応えるための総感染者数や基本再生産数などの統計値とともに、感染シミュレーションを現実世界に同化させるための各種パラメータを含むことです。このことにより、高度な社会感染シミュレーションと実社会の感染状況の同化が実現します。その上で、実社会に限りなく一致したデジタルツインがあればこそ、それに反実仮想的に検証したい施策を組み込むことで、その効果を信頼性高く予見すること（②）が可能になります。

社会感染シミュレーションの予備的な結果 -通勤電車、病院等に関する施策例-

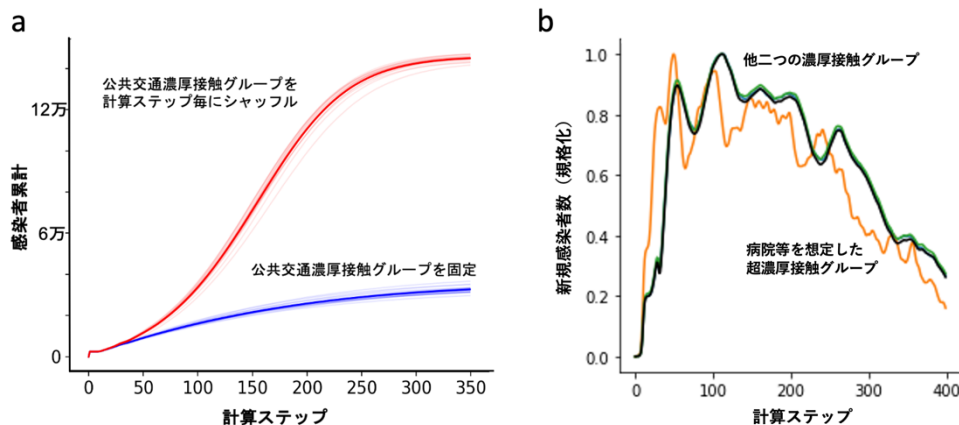


図2 二つの有効な施策例：「通勤電車の乗車位置固定」と「病院等感染クラスタの早期隔離」

a) 各個人は家族（1-6人）、職場（5-10人）、公共交通（10-20人）の濃厚接触グループにそれぞれ属し、そのいずれかに感染力を有する者があらわれると、その人数に応じて感染します。その後は標準的な感染モデルであるSEIRモデルにもとづき、平均的に10計算ステップの潜伏期間の後に感染力を持つようになり、20計算ステップ後に免疫を獲得します。当該結果は総地域人口25万人で計算したものであり、公共交通濃厚接触グループのシャッフルの有無でその後の感染者累計の動向に大きな差が出ています。このことは、「電車通勤者に対して、電車の発車時刻と乗車位置を固定してもらうことが有効な施策」となりうることを示しています。**b)** 地域人口のごく少ない割合の人が属する超濃厚接触グループ（病院や老人介護ホーム）が存在するとき、その超濃厚接触グループの新規感染者数の動向が、その他の一般的な濃厚接触グループに十数計算ステップ（1ステップ=一日）ほど先行します。大規模火災における木造建築の密集地と、それらの間を飛び交う火の粉のような関係にあるとも言えます。「病院等で感染クラスタが発生した場合には、速やかに感染疑いのある者を隔離する」が有効な施策となりうることを示唆しています。

基本的な感染シミュレーションでは、誰もが誰にも同じ割合で濃厚接触し得るとの仮定が置かれますが、実社会はより複雑であり、ここに地域性が色濃く出ると考えています。予備実験として、Elvebackら[1]に倣って、多次元（例：家族、職場、公共交通、店舗等）、多階層（例：職場内のグループ、課、部）の濃厚接触グループを扱う感染シミュレーションを構築しました。

ここで、すべての個人は複数の濃厚接触グループに属し、SEIR(Susceptible -> Pre-infectious -> Infectious -> Recovered) モデルに基づき、いずれかの濃厚接触グループに感染力をもつ者が出現すると、その数に応じた確率で感染し、潜伏期間を経た後に感染力を有し、最終的に免疫を獲得して感染力を失うことと示しています。

同化前の予備的なシミュレーション結果とはなりますが、

- ・通勤電車において、各人が発車時刻および乗車車両を固定することにより、地域全体の感染拡大を1/5程度に抑えることができる（図2a）
- ・病院や老人介護ホームなど接触度合いが特に高い施設の新規感染者数の増減は、地域全体の増減に1~2週間

ほど先んじており、そこでの早期収束（少しでも感染疑いのある方の早期ホテル収容等により）がその後の感染爆発を防ぐ（図2b）。

などの結果を得ています。これらの結果は、PCを用いて25万人規模での計算結果となりますが、メモリ効率の高いコーディングにより、スパコン等を用いることで一億人規模の計算を行うことが可能となっています。

生成モデルとの関係性 - 逆問題を順問題にすり替える -

提案システムを別の観点から眺めるなら、Kawatoら[2]やMumford[3]によって90年代初頭に提案された脳のモデルの一種である「生成モデル」の拡張として捉えることができます。「生成」の名は、それまでの脳の感覚情報処理の捉え方として、感覚入力から多段の感覚特徴抽出を経て高次のシンボリックな表象を得るボトムアップ処理が支配的であるとされてきたなか、逆に、シンボリックな表象から感覚入力を復元するトップダウン処理を重視したことに由来します。特にKawatoらが強調したのは、脳のトップダウン処理が外界の順モデル（因果性を順方向にモデル化したもの 例：シンボリックな表象を二次元画像に変換するコンピュータグラフィックス）の役割を果たすことで、一般的に逆問題となる感覚情報処理（例：非可逆圧縮された二次元網膜像から三次元世界を推測）を順問題にすり替える効果でした。

その視点から提案システムを捉えるならば、ボトムアップの神経機構そのままに、トップダウンの生成機構（外界の順モデル）を物理シミュレーションに置き換えた「ハイブリッド生成モデル」であると言えます。

その文脈のもとで、①の感染状況の全容把握が困難である理由を考えると、能動性の高い検査プロセスによって非可逆に圧縮された部分観測情報から、感染全容を導き出すことが、逆問題に相当するからだと解釈できます。その上で、提案システムがこの問題を解決できるのは、そのトップダウン機構として、感染の順モデル（感染シミュレーション）および検査過程の順モデル（仮定の能動的部分観測）を有することで、Kawatoらの主張そのままに、逆問題を順問題にすり替えているからに他なりません。

その枠組みのなかで、提案システムの深層学習には、高度に非線形な生成機構に相当するデジタルツイン（感染シミュレーション+能動的部分観測）に対して、その出力から入力への逆マップを例題学習的に獲得することを期待していることとなります。

参考文献

- [1] Elveback LR, Fox JP, Ackerman E, Langworthy A, Boyd M, Gatewood L. (1976) An influenza simulation model for immunization studies. Am J Epidemiol. 103(2):152 - 165.
- [2] Mitsuo Kawato, Hideki Hayakawa & Toshio Inui (1993) A forward-inverse optics model of reciprocal connections between visual cortical areas, Network: Computation in Neural Systems, 4:4, 415-422.
- [3] David Mumford(1992) On the computational architecture of the neocortex, Biological cybernetics 66:3, 241-251.