



2021年11月22日放送

「感染症の数理モデル」

京都大学大学院 環境衛生学教授 西浦 博

はじめに

私は数理モデルを利用した感染症流行のモデリング研究に取り組んでいます。今日は、感染症数理モデルがどのように感染症予防に役立てられているのかをご紹介します。特に最近になって発展した技術だとか、社会的貢献について触れつつ、お話ししていきたいと思います。

感染症の流行モデル

感染症の流行モデルとは、流行のメカニズムそのものを数式で記述した文字通りのモデル、つまり模倣でして、理論上あるいはコンピュータ上で感染症の流行を再現したものです。複雑さは様々で、数式で書ききれないものからコンピュータのプログラム言語でしか書ききれないものまで様々です。

最も典型的で先駆的な使用例として、予防接種のデザインに関する研究が挙げられます。中でも、集団免疫の概念を利用した予防接種戦略が有名です。集団免疫、というのはヒト個人個人の免疫のことでなくて、あるコミュニティで予防接種をしたり自然感染をする人が増えると、多くの接触者が既に免疫を持つ人になるので、感染者数が増えていくのに十分でなくなる、というものです。

1つだけ理論的コンセプトに関して、皆さんの頭の中で計算模様を描いていただかないといけませんので、その話をしましょう。感染症の数理モデルを活用する上で最も重要な感染性の指標として基本再生産数というものがあります。基本再生産数は、集団において1人の感染者が生み出す2次感染者数の平均値のことを指します。例えば、新型コロナウイルス感染症の従来株では2.5くらいと推定されています。

実は、その基本再生産数が予防接種の接種率の目標値を与えます。ここで例えば、基本再生産数が2.5のときを考えましょう。人口中で割合60%の者が予防接種によって免疫を得たとしましょう。そうすると、1人の感染者が生み出すはずだった2次感染者

2.5人のうち、60%に相当する1.5人が免疫を持って防がれることとなります。すると、2次感染は予防接種が60%の接種率で実施されている下では残り40%の者でしか起こりませんから、2次感染者数は1人、つまり、再生産数は1に落ちることとなります。同じ話でさらに、60%よりも高い予防接種率、例えば、80%で接種が実施されたらどうでしょうか。当然ではありますが平均をとると、1人の感染源あたりで1人より少ない2次感染者しか生み出されません。すると、感染者数というのは感染者の世代を経るごとに減っていくこととなります。つまり、COVID-19が予防接種によって制御できる、ということになるのです。

このようにして、基本再生産数は予防接種率の目標を与えるもので、日本の保健所で目標値として使用されている予防接種率はこれに基づいています。

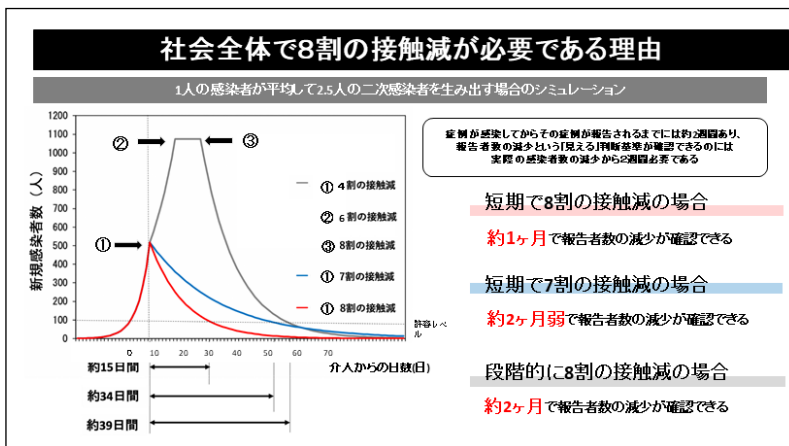
感染症の数理モデル

京都大学 西浦博

- ・感染症流行の数理モデル
「流行動態を模倣する数理的な記述」
流行動態の理解、流行**対策の見積もり・評価**に利用
 R_0 : 基本再生産数、 p : 予防接種率
流行抑止の条件 $(1-p)R_0 < 1 \Rightarrow p > 1 - 1/R_0$
- ・ R_0 が2.5だとすると、 p は0.6よりも大きくなければならない

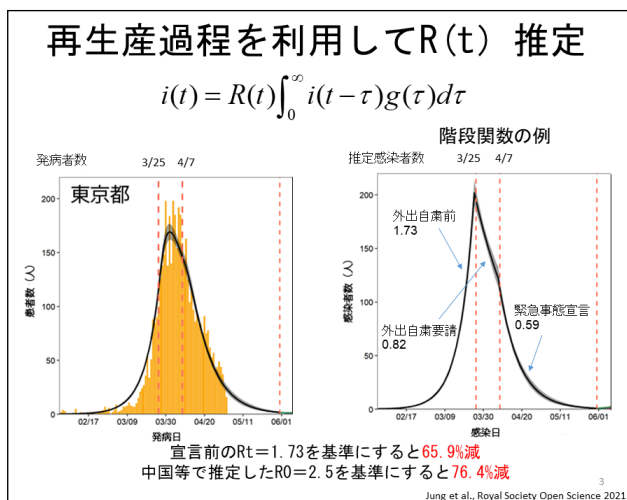
接触減8割の理由

これに関連して少し最近の話題に思いを馳せましょう。2020年4月の第一波の際、国は接触の最低7割、極力8割を削減することによって流行を制御しようとしてきました。いわゆる非特異的対策 Nonpharmaceutical interventions です。この際、諸外国で報告されているように $R_0=2.5$ だとすると、接触が最低でも6割下がらないといけなことがわかります。しかし、6割減だと新規感染者数は横ばいです。8割削減が目標になったのは、そのような状況下で緊急事態宣言をトータルで1か月程度で終わるような減少を期するためには8割削減が良い、という結果を求めたものです。



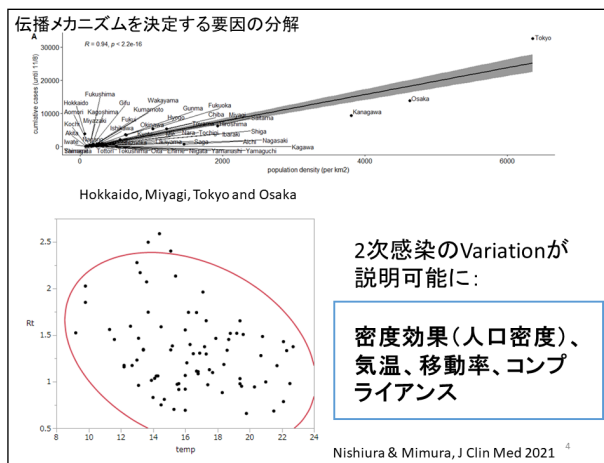
私たちのグループによる評価結果がこちらになります。東京における観察データを分析しています。左は発病日別のデータ、右は感染時刻別のデータですね。どちらも黒の線がモデルで、左の図の黄色の棒グラフが東京都の発病時刻別の観察データです。東京都が対策を本格的に開始する前の3月25日まで、1人あたり1.73人の2次感染が起っていました。夜間の外出自粛などの対策呼びかけ後、それが1未満に減少し、4月7日の緊急事態宣言後、実効再生産数は0.59で1か月に渡って維持されました。この「1

未満が持続的に維持される」という状態は予防接種が普及するまでの間、緊急事態宣言でしか達成されていません。宣言前の1.73を基準にすれば65.9%減、2.5を基準にすれば76.4%減と、8割までとはいきませんが、しっかりと感染者数は減少に至る成果が得られました。

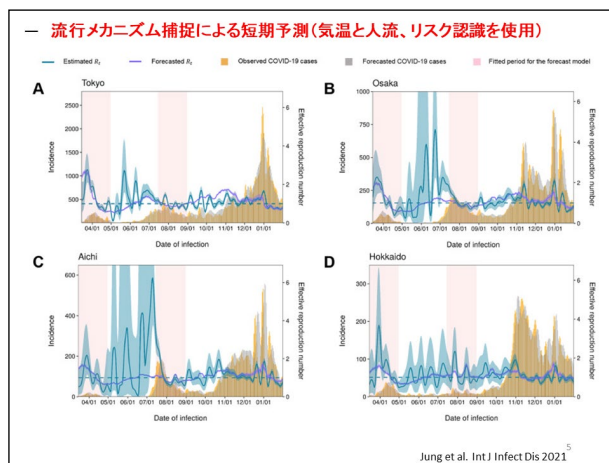


実効再生産数

そのように対策下で時々刻々と2次感染パターンが変化の中で1人の感染者あたりが生み出す2次感染者数を実効再生産数と呼びます。これまでにCOVID-19の実効再生産数はいくつかの決定要因で変動することが知られてきました。例えば、人口密度です。上の図は横軸を都道府県別の人口密度にして縦軸を累積感染者数にしたものです。人口密度が高いほど、屋内に入って密な接触をする頻度が高く、COVID-19は東京や大阪などの大都市を中心に流行したことはご存知の通りです。左下の図は、接触を減らす対策のおこなわれていない中の気温と実効再生産数の関係をみたものです。気温が下がると再生産数があがるとわかっています。これまでにわかっている決定要因をまとめると、人口密度、気温、移動率、コンプライアンスなどが影響していると言われています。コンプライアンスは、マスクの着用頻度や社会的距離の確保度合などといったものですね。



実際のところ、各都市で気温と移動率、それからヒトがリスクを認識する報告日別の感染者数を説明要因として回帰をすれば実効再生産数は予測可能であることが知られています。ここに挙げた図4つは日本の大都市における2020年の実効再生産数です。8月31日までのデータを Learning data、



つまりモデルをフィットするものとして、9月1日以降の予測を行ったものです。水色の影付きのラインが感染者の観察データに基づく実効再生産数、紫が気温や移動率を利用した予測です。9月1日から翌年1月にかけての再生産数が捕捉されていることがわかるでしょうか。

感染リスクの濃淡は明確


また、観察されたクラスターの発生地に関する情報も本流行では極めて重要です。ここで左の青枠に入っている業種は、これまでにクラスターの発生が認められた場を第一波から第二波にかけてまとめて列挙したものです。共通項は屋内であり、唾液、つまり飛沫の飛び交いやすいところ、そして大きな声か早い呼吸を伴うところだと考えられてきました。リスクの濃淡が明確であるのが特徴なのです。クラスター発生の業種は感染性が高いと考えられた変異株でも大きく変わっておらず、3密と呼ばれるリスクの総称が如何に大切であるのかを反映しています。

観察データからわかっていること


ライブハウス、カラオケ
接待飲食店
パブ、バー、居酒屋
フィットネスクラブ、ジム
医療施設、介護施設

「リスクの濃淡が
明確そうである」


①換気の悪い
密閉空間



②多数が集まる
密集場所



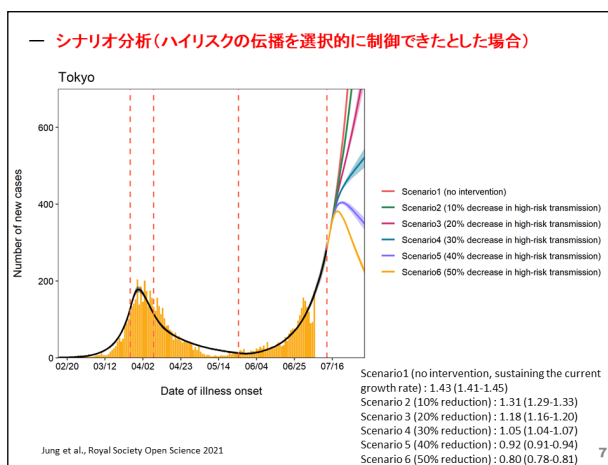
③近くで会話や
発声をする
密接場面



[共通項]
- 屋内
- 唾液(飛沫)
- 大きな声、呼吸数

新型コロナウイルスへの対策として、クラスター(集団)の発生を抑制することが重要です。日常の生活の中で3つの「密」が重なるといよいよリスクが高まります。

こちらの図は伝播にハイリスクの場での接触とローリスクの場という 2 つの種類が挙げられたときのシナリオを示しています。私たちは第2波が起こる前から経時的にこういったシナリオを提示してきました。全ての接触が第一波前程度で実施されると、シナリオ1のように流行が起こります。しかし、10%や20%のハイリスクの接触が制御されると流行が後れ、40%以上のハイリスクの接触が制御されるとそれだけで流行が制御可能かも知れない、とするものです。実際に、第2波では緊急事態宣言が発出されなかったことをご記憶の方もいらっしゃるものと思います。



おわりに

感染症流行の予測や対策というのは、やみくもに行うのではなくて、ヒトの接触パターンや人口動態を加えた現実的な数理モデルを用いて観察情報のエッセンスをとらえることが重要です。それができれば、最も妥当な予測が得られますし、最も効率的で効

果的な流行対策の方向性を明示できます。いままでのアカデミアの枠を超えて感染症研究を爆発的に進化させ得る技術として、感染症数理モデルが活用されているお話しをご紹介します。