

インフルエンザパンデミックを阻止する社会的協調行動の創発機構

谷本 潤

九州大学大学院総合理工学研究院 教授、副研究院長

【スライド-1】

私の専門は統計物理学でありまして、普段、医療とは、お医者さんにかかるときぐらいしか関係はありません。

【スライド-2】

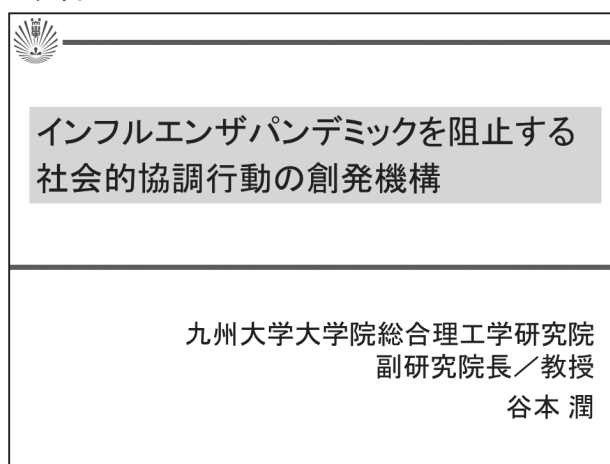
計算機の中で人口社会というものを構築して、そこにインフルエンザ…いわゆるパンデミックが起きるのですけれども、その非常に有効なプロビジョンに先制的なワクチン接種があり、それをする・しないというのは人々の意思決定に委ねられているわけです。これが社会ジレンマを生むのですが、どういうネットワークの構造があると社会ジレンマが助長されるのか、人々の意思決定がどのように変容するとそのパンデミックを抑制することができるのか、あるいは助長してしまうのかということをも明らかにするモデルを作りました。本日それについてご報告するというものです。

今ちょっと申し上げましたけれども、先制的なワクチン接種が、唯一とは申しませんが非常に有効な手段であるということはいくつも知られています。ただ、ご存じかとは思いますが、ワクチン接種のパラドックスというのがどうしても介在してしまう。

【スライド-3-1, 3-2】

これはどういうことかと言いますと、集団の中である一定の人がワクチン接種をすると、ハードイミュニティー…集団免疫というのが構築されてしまうわけです。そうすると、あとの人は打たなくてもかかる可能性・確率が非常に低くなる。これは私の元々の専門であ

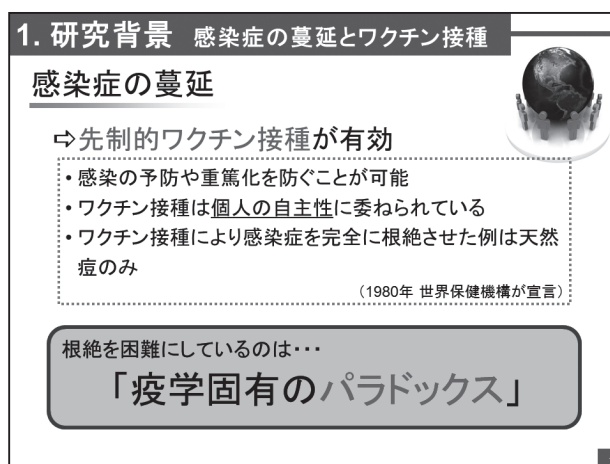
スライド-1



スライド-1

九州大学大学院総合理工学研究院
副研究院長／教授
谷本 潤

スライド-2



1. 研究背景 感染症の蔓延とワクチン接種

感染症の蔓延

⇒先制的ワクチン接種が有効

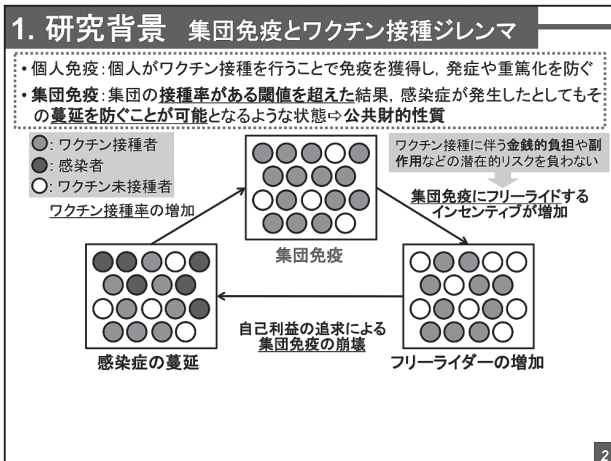
- 感染の予防や重篤化を防ぐことが可能
- ワクチン接種は個人の自主性に委ねられている
- ワクチン接種により感染症を完全に根絶させた例は天然痘のみ

(1980年 世界保健機構が宣言)

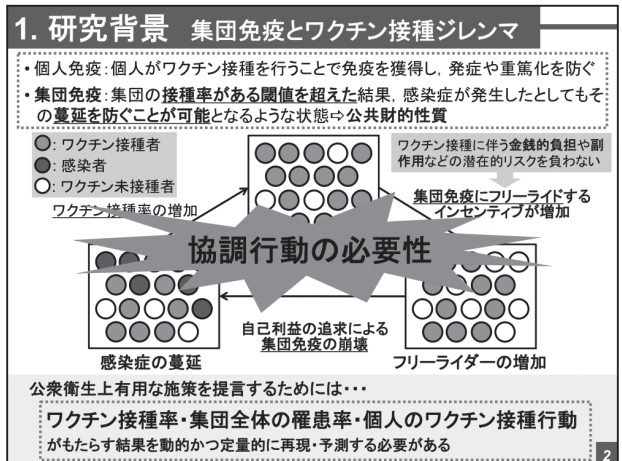
根絶を困難にしているのは…

「疫学固有のパラドックス」

スライド-3-1



スライド-3-2



る数理科学に戻って見ますと、公共財の性質を持っていて、それにただ乗りをしようとする人と、そうはせずにきちんとワクチン接種をする人との角逐のドラマと見る事ができるのです。これを数理的な社会ジレンマと言っており、特にこのジレンマクラスのモデルのことをパブリックグッズゲームと言っております。

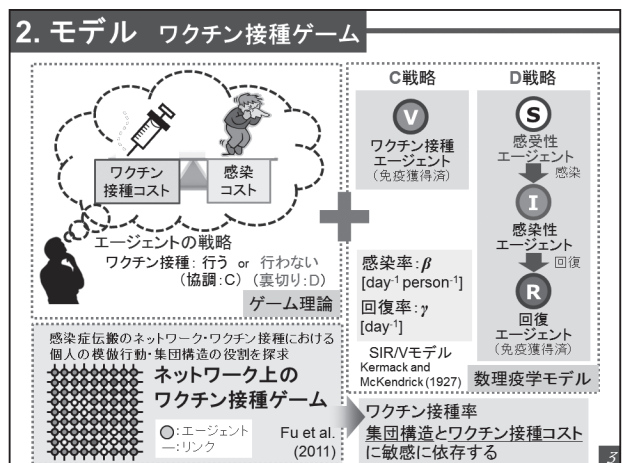
ここでターミノロジーとして出てくる協調行動というのは、当然のことですけれども、先制的なワクチン接種をするという行動になるわけです。ただ乗りをする人は接種をしないということになるわけです。

【スライド-4】

構築したモデルですが、冒頭に申し上げたように、人工社会の中でこういうモデルを組み立てます。この研究の非常にオリジナリティーとして主張したいところにも関わりますが、疫学の数理モデルとして非常によく使われているSIRモデルを一方で持ってきて、これでインフルエンザを想定しているエピソードがどう人々の中で流行していくかというダイナミクスを追いかける。その人々の意思決定については、進化ゲーム理論を使う。これを組み合わせるということをしております。

具体的に申しますと、計算機の中でオブジェクトというのを発生させます。これは人間を模擬しています。この人間は、ある程度知的に振る舞うことができます。つまり意思決定をするということです。その意思決定が、ここにあるワクチンを接種するかしらないかです。彼らにとってみると、ワクチン接種をするということはコストを伴うわけです。しかしそのコストをケチると、ひょっとすると感染するかもしれない。感染のリスクもありますから。感染すると、正規化したコスト1を払わなければいけない。あ

スライド-4



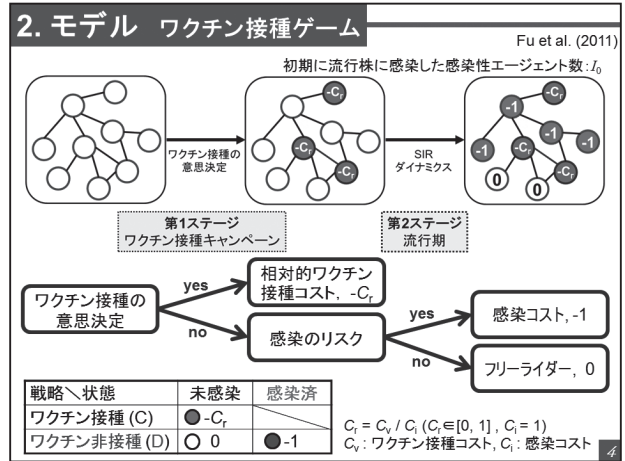
る意味では、元も子もなくなってしまうわけです。ここでどうするかという相談になるわけです。この、どうするかというのは、その流行シーズンでどの程度インフルエンザを模倣した感染症が流行するか、自分が感染するかしないかに関わってくるわけです。

【スライド-5】

さて、このモデルの少し細かい中身ですけれども、エージェント、これは人間です。計算機の中でオブジェクトとして、ここに発生させるわけです。最初に彼らは意思決定をします。ワクチンをする・しないということです。する人にとっては、初期にCのワクチンの接種コストを払うことになります。

次にモデルが、SIRを適用した感染症のダイナミクスのモデルへと流れていきます。時々刻々、時間が展開していく中で、感染した人は、1のコストを払わなければいけないということが起きるわけです。

スライド-5



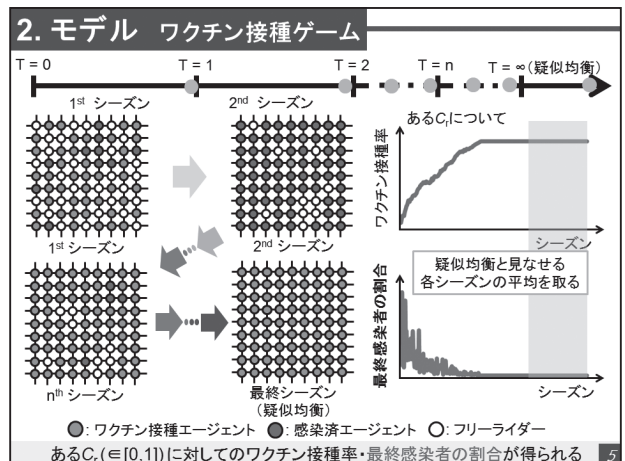
【スライド-6】

これを1セットにして、逐次繰り返していくのですが、この時点 (1感染シーズン終了時点) で、それぞれのエージェントは意思決定を見直すことが許されています。つまり、自分が感染したかしたなかったか、フリーライドできちゃったかできなかったか、これに依存して、次の期に自分がワクチン接種をするかしないかという意思決定を見直すことが許されているわけです。

これを、進化計算と言いますが、計算機の中で繰り返していきます。エージェントたちの意思決定を逐次、時間発展させていくわけです。そうすることによって、エージェントの中のワクチン接種率の変移を追いかけることができるわけです。ワクチンの接種率に応じて、その期の最終感染者サイズというのが計量できるわけです。

これを僕たちのジャーコンで均衡、イクイリビウムと言いますが、時間展開がやむまで続ける。で、この終状態を計量することによって、一連の数値実験を繰り返していくわけです。

スライド-6



【スライド-7】

さて、このエージェントの意思決定ですが、この研究では2つ大きく取り上げています。

フェルミ確率…統計物理学で使うファンクションなのですが、自分、エージェント*i* (隣人の中からランダムに選択したエージェント) という自分の利得、それと隣接している隣近所の人(隣人)の行動を模倣するという、この関数は精神として示しています。これはよくある人々の振る舞い(振る舞い)です。隣近所の人(隣人)のやり方をまねるという意思決定の方法です。もう一つは社会全体の利得の平均値の情報をもらって、それとの大小関係で次の期の自分の意思決定を見直す。これは何を模倣しているかと言いますと、例えば国全体で流行に関する情報が与えられる。今どれぐらいは流行っているか、どれぐらい感染している人がいるか、そのリスクがどうか、それに応じて意思決定をするということを表意しているモデルです。この2通りを考えてみるというわけです。

これが数値実験の流れになります。

スライド-7

2. モデル 戦略適応方法

従来の戦略適応方法 (IB-RA)

$$P = \frac{1}{1 + \exp[(\pi_i - \pi_j) / \kappa]} \dots (1)$$

提案する戦略適応方法 (SB-RA)

$$P = \frac{1}{1 + \exp[(\pi_i - \langle \pi_j \rangle) / \kappa]} \dots (2)$$

戦略 \ 状態

	未感染	感染済
ワクチン接種 (C)	● -C _i	● -1
ワクチン非接種 (D)	○ 0	● -1

同じ確率を与える
 ワクチン未接種 エージェント ← 模倣 ← ワクチン接種 戦略

異なる確率を与える
 ワクチン接種 エージェント ← 模倣 ← ワクチン非接種 戦略

【スライド-8, 9】

さて、そのエージェントたちがどう組み上がっているか、これが基盤のネットワークといわれるものです。人間関係を模倣しているものです。現実のリアルな社会システムにおけるネットワークというのは、大きく2つの性質を持っていることが分かっています。

1つはここに出ておりますスケールフリー性、もう1つはスモールワールド性といわれるものです。いずれもヘテロジニアスな次数分布を持っているようなネットワークなわけです。この研究では、その典型的な一つであるバラバシールバータアルゴリズムによるスケールフリーネットワークというのを一つ、想定します。それともう一つ、コントロー

スライド-8

2. モデル シミュレーション条件

□ シミュレーションの流れ

あるC_iについて

初期状態
 ワクチン接種エージェントと未接種エージェントがランダムに分布

ワクチン接種ゲーム
 第1ステージ: ワクチン接種ゲーム
 第2ステージ: 流行期

戦略適応(リスク評価)
 翌年に接種するか否かを再度検討

疑似均衡
 ワクチン接種率と最終感染者の割合を得る

繰り返す
 ワクチン接種率や感染者の割合が更新される

独立に100回の試行

疑似均衡に達する

スライド-9

2. モデル シミュレーション条件

□ シミュレーション条件・パラメータ設定方法

- ▶ 集団サイズ: N = 4900
- ▶ ネットワーク:
 正方格子 (von Neumann近傍)
 BA-SFネットワーク (平均次数<k> = 4)
- ▶ 戦略適応方法:
 Fermi関数によるpairwise比較 (κ = 0.1)
- ▶ 初期ワクチン接種率: f_{c0} = 0.5
- ▶ 感染率: ⇐ 感染リスクが等しくなるような値
 正方格子: β = 0.46 day⁻¹ person⁻¹
 BA-SFネットワーク: β = 0.55 day⁻¹ person⁻¹
- ▶ 回復率: γ = 1/3 day⁻¹ (平均感染日数: 3日)
- ▶ 初期に流行株に感染した感染者数: I₀ = 5
- ▶ アンサンブル数: 100

最終感染者の割合が約9割

正方格子

BA-SFネットワーク

SB-RA (<π_j>の算出)
 戦略s_jをとっているエージェントをサンプリングする割合: 100%

ルになるものですが、現実にはあり得ないわけですが、非常に二次元的に隣近所がずっと接続しているというホモジニアスなネットワークです。これは正方ネットワーク、ラティスと言っています。これを比較対照することによって、結果を得ていくというわけです。

ダイナミクスについては、先ほど説明申し上げたとおりです。

【スライド-10】

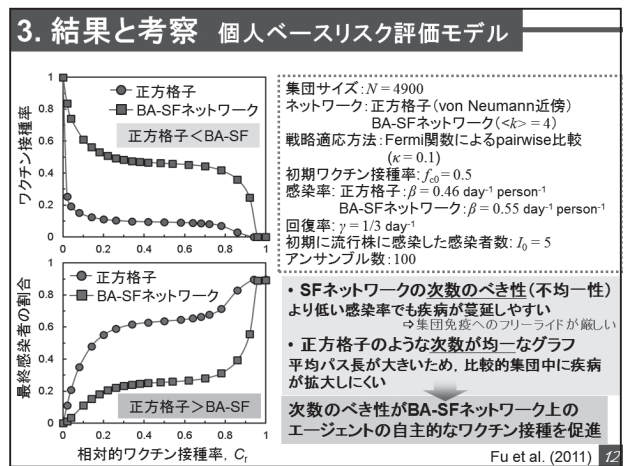
結果の一部をここで紹介したいと思います。

まず基盤のネットワークによってどういう違いが出てくるか。

大きく図が2つ出てきます。上がワクチン接種率です。下の図が最終感染者サイズです。横軸がコストの大小です。左端がワクチン接種コストが0。1は病気になってしまったときのコストと同じワクチン接種コストが掛かるという状況です。これを振っているというわけです。

ご覧いただくと、ラティスのほうがワクチン接種率が高くなっています。それに応じて最終感染者サイズも小さくなっている。これはネットワーク科学で言うところの平均パス長が長いからなのです。スーパースプレッターという人が存在することによって、スケールフリーネットワークの方では予防的にワクチン接種をするという結果になっているものと解釈できます。

スライド-10

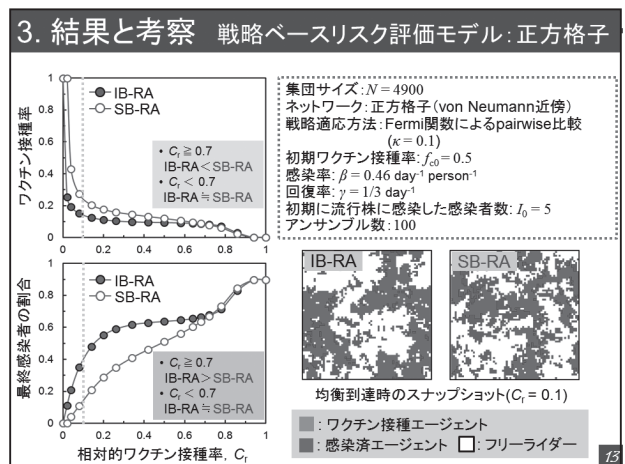


【スライド-11】

もう一つの意思決定のやり方を、2通り変えてみた場合の結果がこちらに表れております。

全き隣人のやり方をコピーするやり方、それと社会の…メディアから与えられる情報に基づいて意思決定をする方法です。これを見ると非常に興味深いのですが、ワクチンの接種コストの高低によって、どちらのほうが効率的に予防できるかというのが明瞭に結果に出てきています。今回新しく考えた、メディアの情報、社会の平均の情報を入れて意思決定するほうが、大部分のコストの領域でワクチン接種率が高くなっているし、最終感染者サイズを小さく抑えることができているという結果が得られています。

スライド-11



【スライド-12】

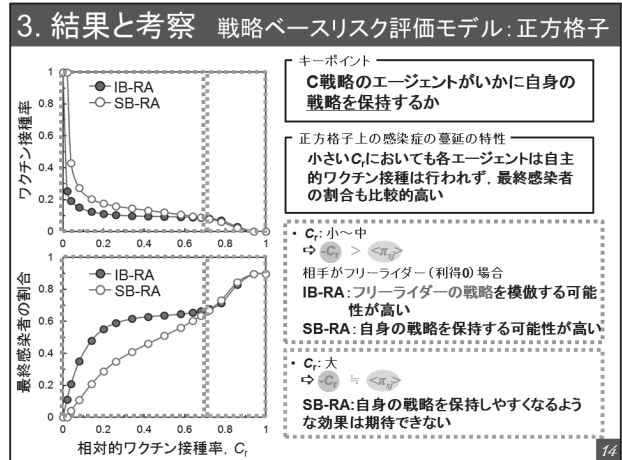
どうしてこういうダイナミクスがもたらされたかについて、ネットワーク科学に基づいて細かく解析していきますと、いろいろな事実が明らかになってまいりました。ここにあるとおりです。

【スライド-13】

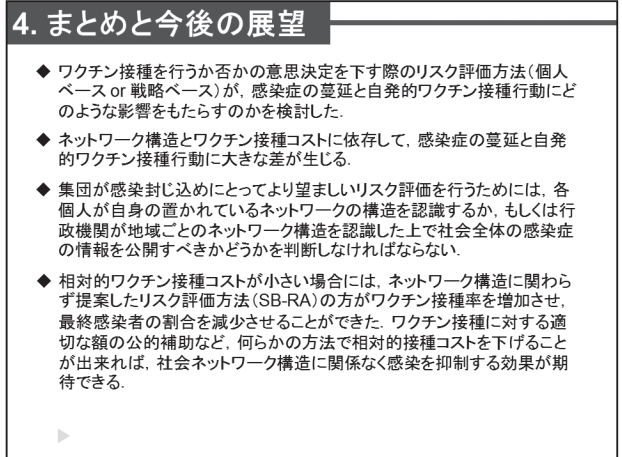
最終的な結論がこのように得られました。

今回、助成いただくことによって、非常に意味のある研究をすることができました。この場を借りて、感謝申し上げたいと思います。ありがとうございました。

スライド-12



スライド-13



質疑応答

会場： 普段はあまり聞く機会のない発表で、大変興味深く拝聴しました。興味の延長線上でちょっと1点お伺いできればと思っています。

最初のフリーライダーの話は、すごく分かるなと思っています。他の人がちゃんとしているから、自分がちょっとぐらいだらしなくても、健康上のデメリットを被ることがない。でもそれを本人は主観的に理解していなくて、「別にやらなくてもいいんじゃない」みたいに誤解しているという構造が、多分あると思うのです。今回のモデルだと自己決定ということベースにされていたと思うのですが、例えば親が子どもに予防接種を受けさせるかどうかというように、意思決定の主体とそれを受ける人が違うような事例でこういうモデルを適用することは可能なのでしょうか。関心がありましたので、お尋ねします。

谷本： こういうものを社会物理学と言いますが、人工社会のこの手法の一番のメリットは、計算機の中の実験ですから、いかようにも可塑的なモデルがつかれることです。非常にフレキシブルです。今言ったようなことも十分可能です。つまりエージェントが多数いて、隣のエージェントが意思決定したがままに隣のエージェントが打つ・打たないを決めるということは、もちろん可能です。

会場： それで、子どもの予防接種の最適なコストの設定というようにところにも生かされてくるといいなと思います。

谷本： そこまでつながるかどうかわかりませんが、ありがとうございました。