

「集団免疫」がやっとわかった！！

2020年5月3日

竹田美紀子（仮説実験授業研究会会員）

<http://kasetu.qee.jp/site/mikiko.shtml>

●はじめに

感染症の広がりに関する理論の中に「集団免疫の理論」というものがあります。

ある集団に、〈その感染症に対する免疫を持った人〉がある一定数以上いると、その集団でその感染症は、どんどん広がるということはない。感染はゆっくり広がり、さらには広がり方はだんだん小さくなって行って、最終的に収束する。

という理論です。

ここから発展して、

ある集団に〈その感染症に対する免疫を持った人〉が全くいない場合、感染が広がる。しかし、何の対策をしなくても、ある一定数の人が感染するとその感染症の広がり収束に向かう。

といわれています。これは、「何の対策もしなくても、〈全く感染しない人〉が存在したまま感染症の広がり収束する」ということでもあります。

私がこの理論の存在を知ったのはずいぶん前のことだったと思います。そんな理論の存在に「へえ、そうなんだ」と思い、同時に何となく不思議な気持ちを抱きました。「本当にそうなのかなあ？なんでそんなことが言えるのかなあ？」と思ったのです。でも、その時は特にそれを追求することはありませんでした。そして、その理論について、何が分からないのかも明確ではありませんでした。

●分からないところが明らかになって

2020年、新型コロナウイルス感染症の感染拡大が問題になると、この集団免疫の理論をあちこちで聞くことになりました。「6~7割の人が免疫を持てば、感染は収束に向かう」と言われています。しかし私には、「どうして6~7割の人が免疫を持ったら感染が収束に向かうといえるのか」、全くわかりませんでした。そして、私はこの理論について、「ちゃんと納得して分かりたい」と思うようになりました。

私にとって、「自分が何が分からないのか？」ということが明確になったのは、村西正良さん〔京都〕作成の授業プラン案〈感染症学入門〉の第1回の検討会の時でした。

その授業プランには集団免疫のことが出てきたのですが、私は村西さんの説明にも納得できず、「私には分からない」「分かりたい」とかなりしつこく追及したのです。そのやり取りの中で、少しずつ私は「自分の分からないところは何なのか」ということが明確になってきました。

そして、その日の寝る前、考えるというほどのこともなく考えていた中で「あっ、そうだ！！そういうことなんだ」と、急にストンと落ちました。そして「インフルエンザなどの感染症の場合、60%程度の人が免疫を持つと感染症は収束に向かう」ということについて、「なぜそんなことが言えるのか」ということもはっきり「わかった！」と思えました。

私はすぐさま村西さんに「集団免疫が、分かったかもしれない」というメールを打ちました。そして、私の理解の仕方を書きました。ドキドキしながら返信を待っていたのですが、翌日、村西さんからは「美紀子さんの集団免疫に関する理解は正しいと思います」という返事をいただきました。ホッとすると同時に、私は、自分が納得できる形で理解できたことがとても嬉しくて、それを伝えたくて、この資料を書き始めました。

●集団免疫・・・私の説明

まず、私の理解した集団免疫の理論について書こうと思います。

もしも「最近集団免疫とかいう言葉をよく聞くけど、あんまり意味

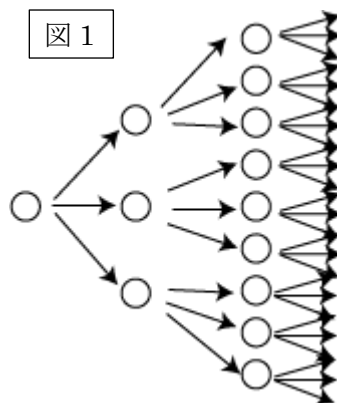
がよく分かっていないな」と思う人に、「分かった！」と言ってもらえたら嬉しいです。

ただし、ここで扱うのは隔離やワクチン等の対策を何も取らないときの理論的な話です

○基本再生産数と実効再生産数

インフルエンザのような感染症の場合、〈感染症に感染した一人が、誰も免疫を持っていない集団に加わった時何人に感染させるか〉という平均の数（基本再生産数）というものが問題になります。インフルエンザの基本再生産数は、3人ぐらいです。新型コロナウイルス感染症の場合も、基本再生産数は3程度とされています。

その時使われるのが図1のような図です。一人の人が3人にうつして、その3人がまた3人にうつして・・・と、〈その集団に、その感染症の免疫を持った人が一人もない場合〉には、こんな感じで感染が広がります。この広がり方で、1日で次の人に感染させるとすると、1週間後には2000人以上の人に感染させることになります。急激に感染が広がるのです。



しかし、この感染の勢いは、最後までずっと続くことはありません。ある程度感染が広がると、その集団の中に〈感染して免疫を持った人〉が出てくるからです。

免疫を持った人はその人自身が感染することもないし、他人に感染させることもありません。（その期間は感染症によって様々です）

だから、〈感染して他人にうつす可能性のある人〉（うつす人）が免疫を持った人に出会っても、その人を感染させることはありません。

最初の頃は、〈うつす人〉が会う人は100%未感染の人です。だから、最初のうちは、図1のように感染は広がっていきます。しかし、その集団に感染して免疫を持った人が増えてきたら、状況は少し変わってきます。

図 2

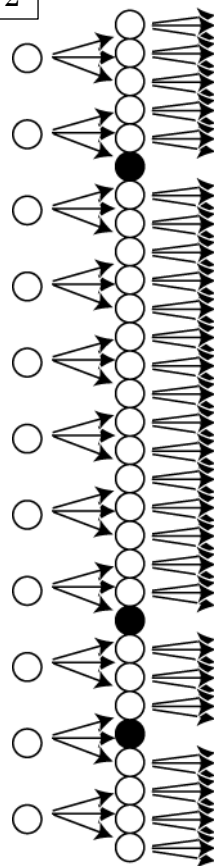
もしも、その集団の 10%の人が免疫を持ったとします。その時は、感染の広がりはどうなるでしょうか。

10%の人が免疫を持っていると、〈うつす人〉が出会う人の中に、未感染の人は 90%ということになります。つまり、〈うつす人〉が 10 人いた場合、その人達が 30 人の人に出会ったとしても、そのうち 3 人はすでに免疫を持っているということになります。(図 2 参照 免疫を持った人は●で表しました)

その 3 人はその人が感染しないだけでなく他人を感染させることはありません。この場合 10 人の人が新たに感染させる人は 27 人ということになり、一人が感染させる平均値は、2.7 人となります。

集団に免疫を持った人が出てくると、再生産数は変わります。この時の再生産数は、実効再生産数と呼ばれます。実効再生産数とはその時のその集団の実際の再生産数であり、状況によって変化していきます。(隔離などの対策をとることによっても変化しますが、ここではそのような対策をしない場合の理論的な話をします)

感染が広がっていけばいくほど、免疫を持つ人は増えていきます。そうすると、〈うつす人〉が出会う人の中の〈未感染者の割合〉は減っていきます。そうすると、それに応じて実効再生産数は小さくなっていきます。



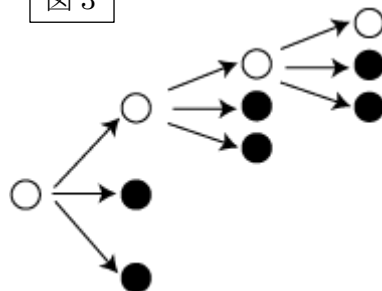
○集団に免疫を持った人がいる場合

それでは、その集団に最初から免疫を持った人がいる場合にはどうなるのでしょうか。

基本再生産数 3 の感染症で、すでに免疫を持った人が 60%いた場合のことを図で表してみます。●が、免疫を持った人です。60%ということは 3 人のうち 2 人が免疫を持っているということになります。

免疫を持った人はその人自身が感染す

図 3



ることもないし、他人に感染させることもありません。だから、感染の広がりには図3のようになります。この場合の実効再生産数は1になります。

図3のことが永久に続くとすれば、新たな感染者はずっと同じ数です。爆発的に広がるということはありません。ゆっくり広がって感染者は増えていきます。

私は、村西さんとの検討会の時にも、ここまでは分かっていました。しかし、「このあと実効再生産数がさらに下がっていく」ということがよく分からなかったのです。

私が、「ああ、そうか～～」と思ったのは、この場合も、感染が広まると、「〈うつす人〉が出会う人の中で〈未感染者の割合〉がさらに減っていくのだ」ということに気づいたときでした。

〈免疫を持った人〉は最初は60%だったわけですが、感染が広がると〈免疫を持った人は〉70%、80%と増えていきます。すると〈うつす人〉が出会う人の中の〈未感染者の割合〉は最初の40%から30%、20%と減っていきます。そうすると〈うつす人〉の中には「出会った人のすべてが免疫を持った人だった」という人も出てきます。〈一人当たりの平均の感染者数〉は最初1だったのが、1以下になります。つまり、実効再生産数は「1以下」になるのです。

「実効再生産数が1」ということは、「新たに感染する人の数は前と同じ」ということでした。「実効再生産数が1より小さい」ということは、「新たに感染する人の数は前より減る」ということです。減っていったら、実効再生産数が0.5・・0.3・・となり、さらに0.1が0.01になり、0.001となっていくことが「収束に向かう」ということです。

※ ※ ※

先程は、「最初から免疫を持った人が60%いる場合」について考えました。しかし、最初から免疫を持った人がいなくても、感染が進むと徐々に〈免疫を持った人〉が増えます。そして、感染した人が増えていった結果、〈免疫を持った人〉が60%に達すれば、これと同じことが言えます。

つまり、〈基本再生産数が 3 の感染症〉の感染者が〈誰も免疫を持っていない集団〉に加わった場合、免疫を持った人が 60%になるまでは、〈新たに感染する人の数〉は増える一方です（隔離などの対策をしなかった場合）。しかし、60%になると実効再生産数が 1 になるので、〈新たに感染する人の数〉は減少に転じ、その後収束に向かうと言えるのです。

新型コロナウイルス感染症の場合は、基本再生産数が 3 だと考えられるので、ここで説明したことがあてはまります。（ただ、60%の人が感染したら、そこですぐに感染が止まるわけではありません。そこが〈新たな感染者数〉が減少に転ずる境目だということです）

●いろいろな場合について集団免疫率が計算できる

前の段落に書いたことを、一般化すると以下のように言うことができます。

ある集団に、〈その感染症に対する免疫を持った人〉が実効再生産数が 1 になるぐらいの割合いれば、または、いるようになれば、

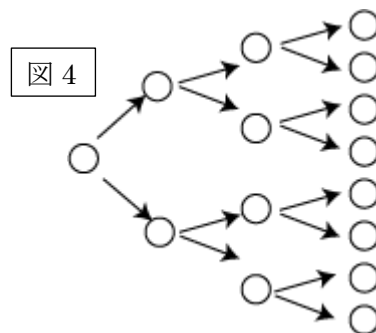
その集団で、その感染症の感染者の増加は、だんだん少なくなっていく、最終的に収束する。

これを使うと、基本再生産数がどんな数の場合でも集団免疫率（何%の人が免疫を持ったら感染は収束に向かうか）が、計算できます。基本再生産数をもとに〈実効再生産数が 1 になるような割合〉を考えればいいのです。

私は嬉しくなって、基本再生産数が他の数の場合についても考えてみることにしました。

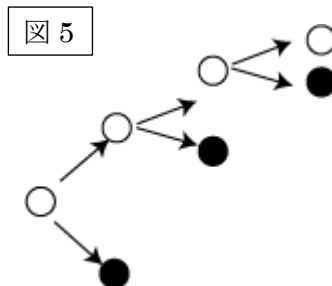
○基本再生産数が、2 の場合

基本再生産数が 2 ということは、感染した人は平均 2 人に感染させるということです。（図 4）



もしも、2人のうち1人が免疫を持っていれば、実効再生産数は1になります。これを図で表すと図5のようになります。

そして、感染が広がれば、実効再生産率は1以下になり、どんどん減って行って感染は収束していくのです。



基本生産数が2の感染症の場合の集団免疫率は50% ($\frac{1}{2}$) です。

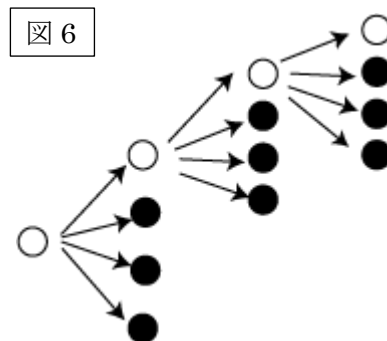
(50%の人が免疫を持てば収束に向かう)

○基本再生産数が、4の場合

基本再生産数が4ということは、感染した人は平均4人に感染させるということです。

もしも、4人のうち3人が免疫を持っていれば、実効再生産数は1になります。

これを図で表すと、図6のようになります。



基本再生産数が4の感染症の集団免疫率は、75% ($\frac{3}{4}$) です。

(75%の人が免疫を持てば収束に向かう)

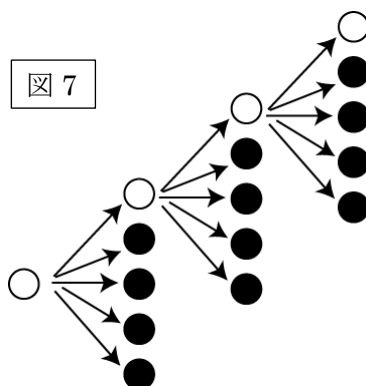
○基本再生産数が、5の場合

5人のうち4人が免疫を持っていれば実効再生産数は1になります。

基本再生産数5の時は、

集団免疫率は80% ($\frac{4}{5}$) です。

(80%の人が免疫を持てば収束に向かう)



同様に、基本生産数が10の時は、集団免疫率は90% ($\frac{9}{10}$) です。

こんな作業もやってみて、私はやっと「集団免疫の理論が分かった！」と思いました。また、新型コロナウイルス感染症の場合集団免疫率は60～70%だという話もスッキリ納得できました。

集団免疫については公式というものがあるのですが、私はそれについても納得することができて嬉しくなりました。

公式は、一般に 「 $1 - \frac{1}{\text{再生産数}}$ 」 と書かれています。
「 $1 - \frac{1}{\text{再生産数}}$ 」 というのは 「 $\frac{\text{再生産数}-1}{\text{再生産数}}$ 」 と同じなので、私の考え方そのものです。

○実効再生産数を減らす手立て

実効再生産数は、「感染して免疫を持った人を増やす」以外の手立てでも減らすことができます。それは人と人との接触を減らすことです。人と人との接触が少なくなれば、〈うつす人〉が他人を感染させる数も少なくなるので実効再生産数は小さくなります。

予防接種も治療薬もない〈人から人へうつる感染症〉が流行し始めた時、多くの国では感染者が少ないうちに、〈人と人との接触〉を小さくすることによって実効再生産数を小さくして感染を収束させようとします。

集団免疫の理論で60%の人が感染したとすると、例えば人口1億2千万人の日本の場合7000万人以上の人が感染することになります。その中で1割の人が重症化したら700万人です。短い期間にそれだけの人が入院することになったら医療崩壊が起こり、助かるはずの命が助からなくなる可能性もあります。重症化の可能性のある感染症では、〈集団免疫によって感染を収束させるという手立て〉は、とても危険な方法ともいえます。

そのため集団免疫の理論は予防接種によって免疫をつけて感染を防ぐときに、「どの程度の人に予防接種をすればいいか」というような場面で使われます。

●モデルと理論

今回の集団免疫の理論の場合、人を○で書き、感染を矢印で示して

考えました。このような図をモデル図と言います。モデル図は実際の感染の広がりを正確に表しているわけではありません。「すべての人が均等で、同じように他人と触れ合った場合にはこうなるであろう」という状態について考えているだけなのです。(実際には「毎日たくさんの人に会う」という人もいれば、ほとんど人に会わないで一日を過ごす人もいます)

だからといってこのモデル図に意味がないわけではありません。社会全体のことは、条件を整えて実験することが簡単にはできません。だから、モデル図を書いて考え、実際と照らし合わせたり、現実的な要素を加えたりしながら、理論を完成させていくのは一つの有効な研究方法なのです。

感染症の研究ではこれ以外にもモデルを作って、それを数式に表して行う研究(数理モデル)が行われています。専門家はたくさんのデータをその式に当てはめて、「もしもこのままの状態が続いたら、この先はこうなるだろう」などという予測をしています。

そういう研究法は自然科学でも同じです。実際に真空をつくることができなくても、真空状態を考えて理論を完成させてきました。原子や分子の研究は実際に原子を見ることができるようになる前から、空想したりモデルを作ったりして、それを現実と突き合わせながら理論を完成させてきているのです。

「見えないから」「分からないから」といって、研究はできないわけではない。いろいろな方法で、見えないものをみえるようにしたり、分からないことを、ほんの一部分であっても分かるようにしていく。その時に、モデルだとか、グラフだとか、数式だとかいったことが有力な手立てとなるんだな〜〜と、知らなかったわけではないのですが、そんなことをまたしみじみと感じました。

新型コロナウイルス感染症はたくさんの楽しみごとを奪いましたが、そのお陰で、いろいろなことを考えたり調べたりして、新しく世界が広がったように思えることもいくつか出てきました。それがとても嬉しいです。