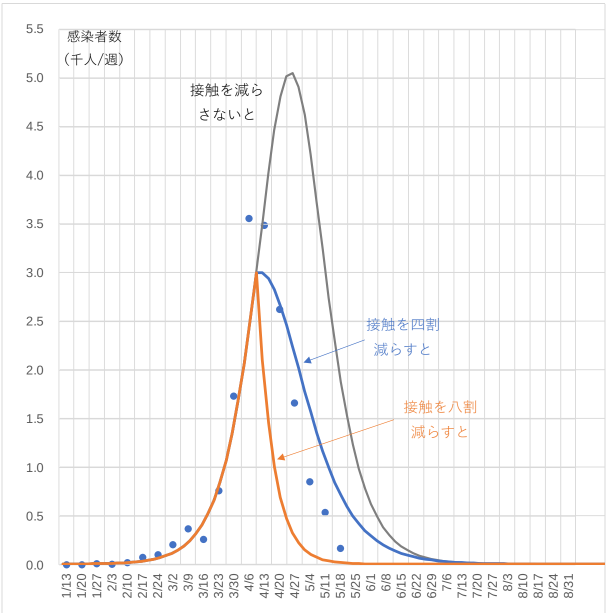
何割のひとが新型コロナウイルスの免疫を獲得するか？

2020 年 5 月 30 日

はじめに

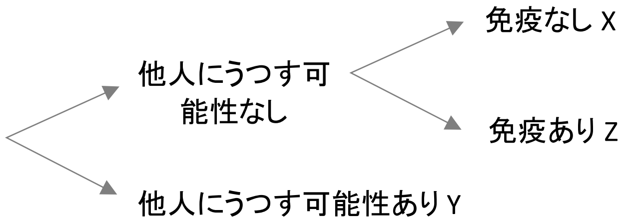
新型コロナウィルスの拡散は「三密」を避ける国民の努力によって収束に向かっています。4 月 21 日付のブログで接触割合を減らすことが最も即効性のある対策であること、それによってどの程度感染を抑制することができるのか、また収束の時期はいつ頃か、を簡単な方程式を使って予測しました。2020 年 5 月 22 日現在の週間感染者の推移は以下のとおりです。実践が予測、青色のドットが厚生労働省から公表されている感染者数です。



さて、感染の収束が明らかになったのちは体内に抗体ができているかどうかに関心が移ると思われます。感染者が 31 万人を超えたアメリカのニューヨーク州で 1 万 5 千人を対象に行われた抗体検査の陽性率はニューヨーク市内でおよそ 20%であったと公表されました（5 月 2 日）。抗体保持者の割合が意外に多いと感じた方が多いのではないでしょうか。日本ではまだ大規模な調査が行われていないため抗体保持者の割合がわかりませんが、感染者数の推移を予測したように抗体保持者の割合も予測することができるでしょうか。今から 41 年前の 1979 年に「伝染病は人口を抑制するか？」というテーマに数理的に取り組んだふたりの学者（アンダーソンとメイ）の論文（*Nature Vol.280*）を参考に、この日本で何割のひとが新型コロナの免疫を獲得するのか？を予測します。

基本理論

まず全人口を X、Y、Z の三グループにに分類します。分類の仕方は以下のとおりです。



そして、この三つのグループがどのように相互に影響し合うかを数式に表します。

$$\frac{\mathrm{dX}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{a}(X + Y + Z) - \mathrm{bX} - \beta \mathrm{XY} + \gamma \mathrm{Z} \qquad \cdots ①$$

$$\frac{\mathrm{dY}}{\mathrm{dt}} = \beta \mathrm{XY} - (\alpha + \mathrm{b} + \mathrm{v})\mathrm{Y} \qquad \cdots ②$$

$$\frac{\mathrm{dZ}}{\mathrm{dt}} = \mathrm{vY} - (\mathrm{b} + \gamma)\mathrm{Z} \qquad \cdots ③$$

ここで、

X は伝染病にかかる可能性のあるひと（以下、感受性者）の数
Y は伝染病に感染していて他人にうつす可能性のあるひとの数（症状の有無は問いません）
Z は伝染病から回復したひと（免疫があるため他人にうつす可能性がないひと）の数
a は自然出生率
b は自然死亡率
v は伝染病からの回復率
$\boldsymbol{\alpha}$ は感染による死亡率（以下、感染致死率）
$\boldsymbol{\beta}$ は免疫のないひとが感染者に出会って感染する率
γ は免疫を失う率

です。

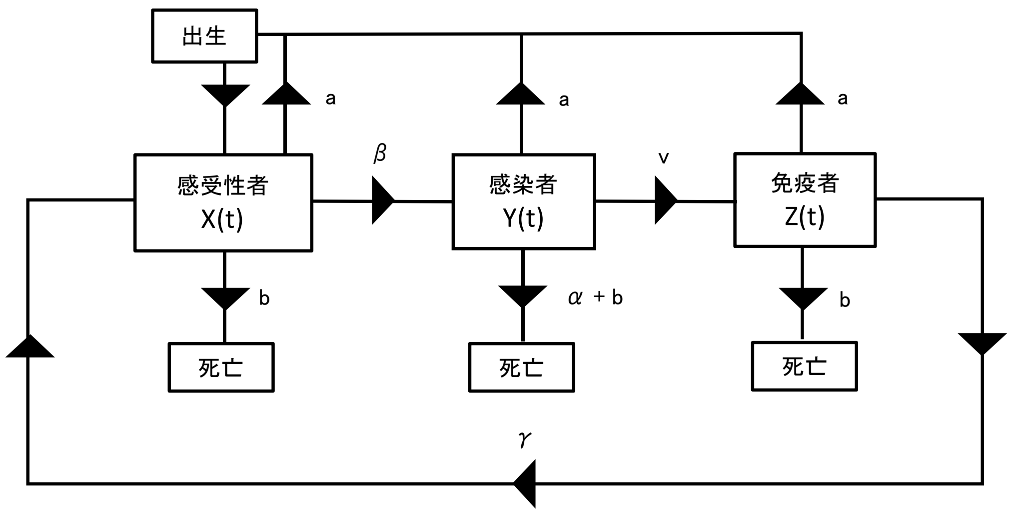
① 式は感染症にかかる可能性のあるひとの数 X がどう変化するかを表しています。出生率 a が X だけでなく Y と Z にもかかっているのは生まれたばかりの子供はすべて感受性があると仮定しているからです。X の減少要因は自然死 b と感染者 Y との接触 β、増加要因は免疫の喪失 γ です。

② 式は感染していて他人にうつす可能性のあるひとの数 Y の変化です。感染者の数 Y は免疫のないひと X と接触することによって増えますが（β）、感染による死亡 α、自然死 b、そして伝染病からの回復 v という三つの要因によって減少します。症状の有無は問わずに、とにかくひとにうつす可能性のある人が Y です。

③ は伝染病から回復するひとの数、つまり体内に抗体ができて免疫を獲得したひとの数の変化を表しています。回復率 v で Y から抜け出すことによって増加し、自然死 b と免疫の喪失 γ によって減少します。

アンダーソンとメイは以上の関係を分かりやすくまとめています。図 1 をご覧ください。

図 1



もし病気がなければ Y = Z = 0 ですから、式①～③は、式④に集約されます。

$$\frac{\mathrm{dX}}{\mathrm{dt}} = (a - b)\mathrm{X} \qquad \cdots ④$$

④ を X について解くと、

$$X(t) = X_0 e^{a-b} + C \qquad \cdots ⑤$$

となります。ここで X_0 は初期値、C は任意の定数です。⑤式は出生率 a が自然死亡率 b を上回れば人口はどこまでも大きくなり、下回れば限りなくゼロに近づくことを意味しています。

X + Y + Z は全人口で、以後 N とおきます。式①～③を足し算すると、

$$\frac{\mathrm{dN}}{\mathrm{dt}} = (\mathrm{a}-\mathrm{b})\mathrm{N} - \alpha \mathrm{Y} \qquad \cdots ⑥$$

となり、とてもシンプルな形になります。a−b は病気のないときの自然増加率 r です。人口とは、自然な増加から伝染病による死亡を差し引いた分だけ増えていくものだ、という単純なことをこの⑥式は示しています。

ではここで、方程式①～③の係数に任意の値を選んで X、Y、Z がどのような動きをするのかをみていきましょう。式の中にはいろいろな係数が含まれていますが、⑥式から人口に影響を与える係数は a、b、αの三つに絞られます。中でもαが人口を抑制する係数ですからまずそこに焦点を当てましょう。表 1 をご覧ください。感染係数が低いパターンとして、α=0.03、高いパターンとしてα=0.5 を採用し、その他の係数はすべて同じにして計算すると、X、Y、Z がそれぞれ時間とともにどう変化するかが分かります。図 1 と図 2 をご覧ください。オレンジの実線が人口（X+Y+Z）、青の破線が感受性者（免疫なし）X、グレーの実線が感染者 Y、青の実線が回復者（免疫あり）Z です。

動きの中で注目すべき点がいくつかあります。図 2−1 をご覧ください。伝染病が発生すると免疫をもたないひと X が感染しはじめますから、X は減少し、感染者数 Y は増加します。その後、Y の中から回復者が現れることによって免疫をもつ Z の数は増加します。興味深いのはある程度時間が経過すると感染者 Y と回復者 Z が漸増する一方で、免疫をもたないひと X の増減が止まり平衡する（増えも減りもしなくなる）という点です。人口は、感染者 Y と免疫をもつ回復者 Z の増加によって増え続けます。その結果、感受性者 X の人口に対する割合は徐々に減少する、つまり伝染病にかからない人の割合が徐々に増えるということですから、社会が少しずつよい方向に向かうことを意味します（図 3−1）。ちなみに感染者の割合も増えますが、感染者には無症状のひとも含まれてますので全員が病気に苦しんでいるわけではないことに留意する必要があります。

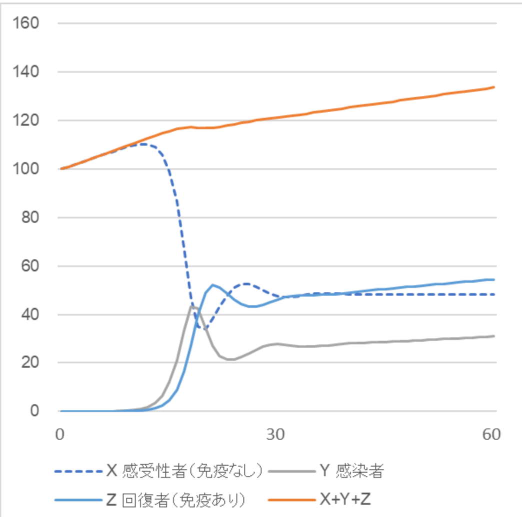
一方、感染致死率αが高いと、人口は減少に転じます。これは式⑥からも想像がつきます。ここで興味深いのは、感染致死率αが高いと、免疫獲得者の割合が低くなってしまうという現象です。図 3−2 をご覧ください。α=0.03 のときは免疫獲得者が六割近くに達しているのに、α=0.5 では 3.5%

程度に留まっています。②式より、感染致死率αが高いと感染者Ｙの数が減少することが分かります。Ｙの数が減ると、③式より免疫保持者Ｚの数も減ります。免疫獲得者を増やすためには感染源を確保しておく必要があるのです。

表１

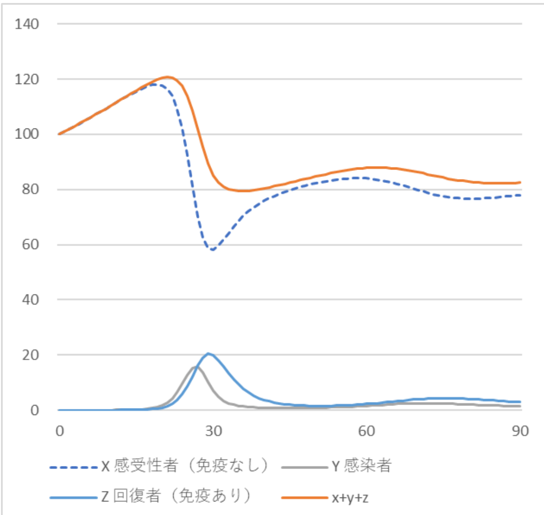
出生率	a	0.25	0.25
感染係数	β	0.02	0.02
感染致死率	α	0.03	0.50
免疫喪失率	γ	0.01	0.01
自然死亡率	b	0.24	0.24
回復率	v	0.45	0.45
x の初期値	X_0	100	100
y の初期値	Y_0	0.001	0.001
z の初期値	Z_0	0.001	0.001

図 2−1



感染致死率α=0.03

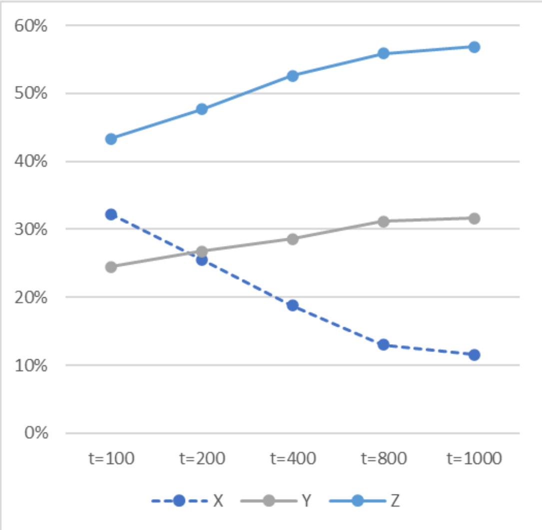
図 2−2



感染致死率α=0.50

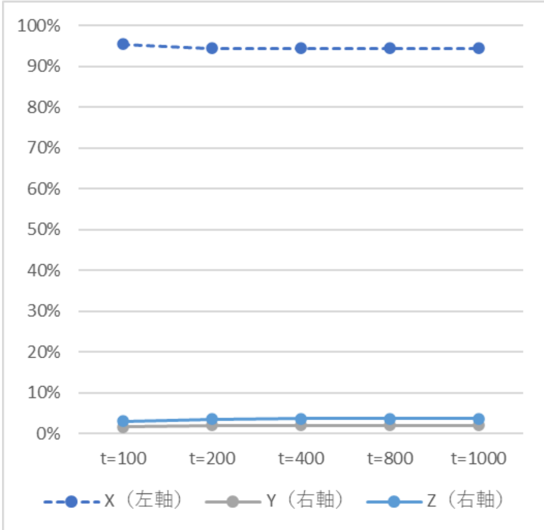
図 3−1

図 3−2



感染致死率 α=0.03

免疫のない感受性者 X の割合が減少し、感染者 Y と回復者(免疫あり)Z の割合が増加する。



感染致死率 α=0.50

感受性者 X は高い割合、感染者 Y と免疫のある回復者 Z は低い割合に留まる。

＜他の係数が気になる方へ＞

感染係数 β :大きいと全体の動きだし(X、Y、Z の増減)が起こるタイミング)が速くなり小さいと遅くなります。
免疫喪失率 γ :大きいと感染者数 Y と回復者数 Z の増え方が少なくなり、小さいと大きくなります。
回復率 v:大きいと動き出しが遅くなり、X の平衡値が高くなります。逆に小さいと動き出しが速くなり X の平衡値が低くなります。

新型コロナウイルスへの応用

では、上記の計算方法を使ってを今後の日本の状況を予測してみましょう。新型コロナウイルスの感染者数、死亡者数、回復者数は厚労省から公表されている 2020 年 5 月 28 日現在の数字としています(表2)。出生率と自然死亡率は厚労省の人口動態調査(令和元年、表2)に依ります(表3)。免疫喪失率についてはデータがありませんので 1%と 10%の二通りで計算しました。高い方を 10%にしたのは、新型コロナウイルスは一度陰性になっても再度陽性になることがあると報道されているためです。日本の人口は総務省のホームページ(2020 年予測)を参照しました。

表2

	PCR検査実施人数(※3)	PCR検査陽性者数	入院治療等を要する者		退院又は療養解除となった者の数	死亡者数	確認中(※4)
				うち重症者			
国内事例(※1)(チャーター便帰国者を除く)	237,367 (+1,886)	16,498 (+38) ※2	1,637 (-151)	136 (-11)	13,979 (+173)	867 (+9)	19 (-1)
空港検疫	43,097 (+706)	170 (+3)	17 (+2)	0	153 (+1)	0	0
チャーター便帰国者事例	829	15	0	0	15	0	0
合計	281,293 (+2,592)	16,683 (+41) ※2	1,654 (-149)	136 (-11)	14,147 (+174)	867 (+9)	19 (-1)

厚生労働省のホームページより。2020 年 5 月 28 日現在。

表3

人　口　動　態　総　覧, 前年比較

	実　　数(人、胎、組)			率[3)]	
	令和元年[1)] 推計数(A)	平成30年 確定数(B)	差(A)－(B)[2)]	令和元年 推計値	平成30年 確定値
出　　生	864 000	918 400	△ 54 000	7.0	7.4
死　　亡	1 376 000	1 362 470	14 000	11.1	11.0
自 然 増 減	△ 512 000	△ 444 070	△ 68 000	△ 4.1	△ 3.6
死　　産	19 000	19 614	△ 600	21.5	20.9
婚　　姻	583 000	586 481	△ 3 000	4.7	4.7
離　　婚	210 000	208 333	2 000	1.70	1.68

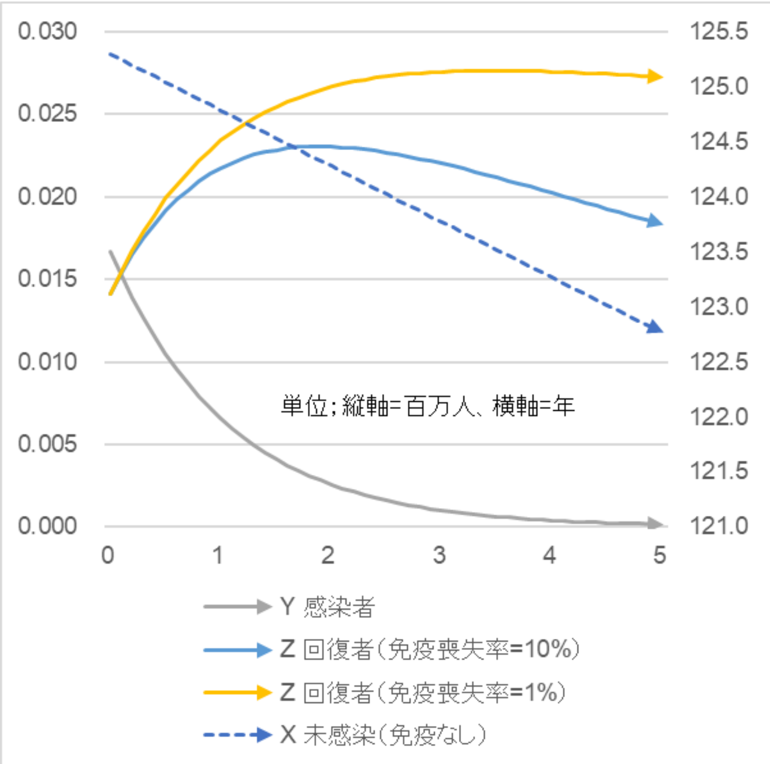
厚生労働省のホームページより

表4

出生率	a	0.007	厚労省の人口動態調査(令和元年)より
感染係数	β	$1.6683*10^{-4}$	感染者(PCR検査陽性者)数の人口比(16,683÷125,900,000)
感染致死率	α	0.052	死亡者 867÷感染者16,683
免疫喪失率	γ	0.100	感染者の一割が免疫を失うと仮定する
自然死亡率	b	0.011	厚労省の人口動態調査(令和元年)より
回復率	v	0.848	退院または療養解除者数14,147÷PCR検査陽性者数16,683
x の初期値	X_0	125.294	日本の人口(百万人)−(Y+Z)
y の初期値	Y_0	0.01668	現時点の感染者数(百万人)
z の初期値	Z_0	0.01415	現時点の退院または療養解除者数(百万人)

これですべての係数と初期値が出揃いましたので、式①～③に代入すれば時間推移が計算できます。図4をご覧ください。青色の破線が感染の可能性がある感受性者 X（右軸）の推移です。人口の自然減とともに、125 百万から 123 百万人に減少します。黄色の実線が免疫喪失率 1%のときの免疫獲得者、青色の実線が同喪失率 10%のときの免疫獲得者の数です。

図4



免疫のない感受性者 X（破線）は人口の自然減とともに減少する。感染者（グレーの実線）が指数関数的に減少する一方で免疫獲得者（黄色と青色の実線）は増加する。

ではここで免疫獲得者 Z に注目します。初期値を表2の「退院または療養解除となった者の数」とすると五年後の数は表5のとおりですが、

表5

免疫獲得者の数	初期値	5年後	人口比
免疫喪失率 = 10%	14,100	18,300	0.015%
免疫喪失率 = 1%	14,100	27,000	0.021%

はじめに、で触れたようにニューヨーク市街地ではなんと二割のひとが抗体検査に陽性を示した事実は無視できません。仮に、生活環境や習慣の違いを踏まえて、日本における抗体保持者

比率を百分の一の 0.2% とすると現時点での抗体保持者はおよそ 25 万人（125 百万人 x 0.2%） となります。これは現状の回復者1万4千人のおよそ18倍です。よって、ざっくりと感染者（無症状を含む感染者 Y と免疫をもつ回復者 Z の初期値はを現状の20倍にしてみましょう。表6をご覧ください。免疫喪失率が 1%の場合、5年後の免疫獲得者数は 54 万人、同喪失率が 10%の割合は 36 万人とでました。いずれにしても人口比では 1%以下です。

表6

免疫獲得者の数	初期値	5年後	人口比
免疫喪失率＝10%	283,000	366,000	0.291%
免疫喪失率＝1%	283,000	544,000	0.432%

さいごに

数学のよいところは計算をすれば具体的な数字がでてくるところです。でてきた数字が現実とマッチするかどうかは、計算式が正しいことと、その式に含まれるパラメーターが正しい必要があります。前者の計算式については 41 年前に学術誌 Nature に掲載された論文から借用し、パラメーターは関係省庁の公表データから算出をしましたが、残念ながら抗体保持者が現時点で何人いるか？免疫を失う割合がどのくらいあるか？についてはデータがありませんので、仮説を立てました。

当たり前のことですが、免疫は実際にウイルスに感染するか、ワクチンを打ってもらうかのいずれかでしか獲得することはできません。しかもウイルスは絶えず進化しています。DNA 形が少し違うだけで免疫系はもう機能しません。今から 100 年前にはやったスペイン風邪（インフルエンザ）は世界で 5 億人が感染し 5 千万人死亡したといわれています。その第一波（1918～1919）で日本人は 2100 万人が感染し 26 万人が死亡しました。第二波（1919～1920）では、240 万人が感染し、13 万人が死亡、さらに、第三波（1920～1921）では 22 万人が感染、3700 人が死亡しています。毎年のように感染者数が波打つ原因はウイルスが微妙に変化していることが原因と推察されています。(2005 東京都健安研セ年報)。新型コロナウイルスの感染者は 2020 年 5 月現在、世界でおよそ 590 万人、死者 36 万人に達しました。スペイン風邪に比べると二桁くらい規模が小さいですが、注目すべきはパンデミックが起こるタイム・スパンが 100 年もあったことです。東日本大震災級の規模の地震は 1000 年に一度といわれています。一度の人生でこれらを同時に経験した稀有な世代は後世に大きな警鐘を鳴らすべき立場にいるのかもわかりません。

おわり