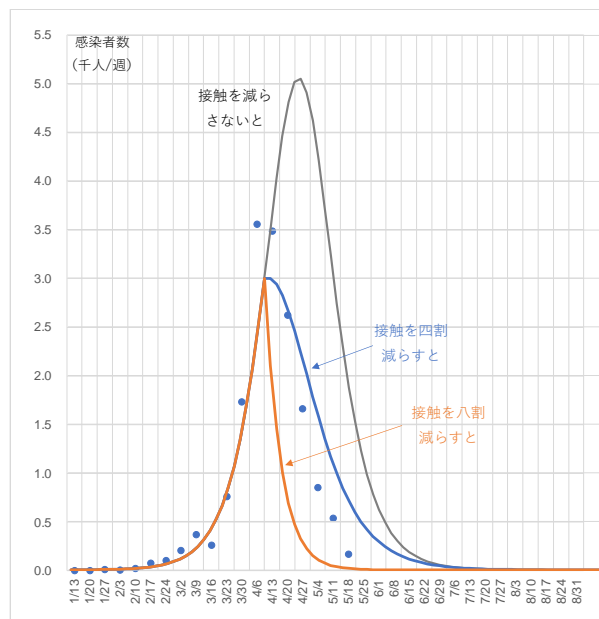


## 何割のひとが新型コロナウイルスの免疫を獲得するか？

2020年5月30日

### はじめに

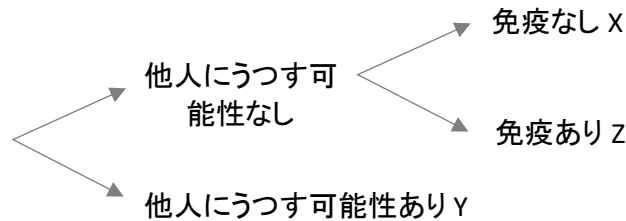
新型コロナウイルスの拡散は「三密」を避ける国民の努力によって収束に向かっていきます。4月21日付のブログで接触割合を減らすことが最も即効性のある対策であること、それによってどの程度感染を抑制することができるのか、また収束の時期はいつ頃か、を簡単な方程式を使って予測しました。2020年5月29日現在の週間感染者の推移は以下のとおりです。実線が予測、青色のドットが厚生労働省から公表されている感染者数です。



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のでしょうか。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のでしょうか。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。

$$\frac{dX}{dt} = a(X + Y + Z) - bX - \beta XY + \gamma Z \quad \dots \textcircled{1}$$

$$\frac{dY}{dt} = \beta XY - (\alpha + b + v)Y \quad \dots \textcircled{2}$$

$$\frac{dZ}{dt} = vY - (b + \gamma)Z \quad \dots \textcircled{3}$$

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

$\alpha$  は感染による死亡率(以下、感染致死率)

$\beta$  は免疫のないひとが感染者に出会って感染する率

$\gamma$  は免疫を失う率

です。

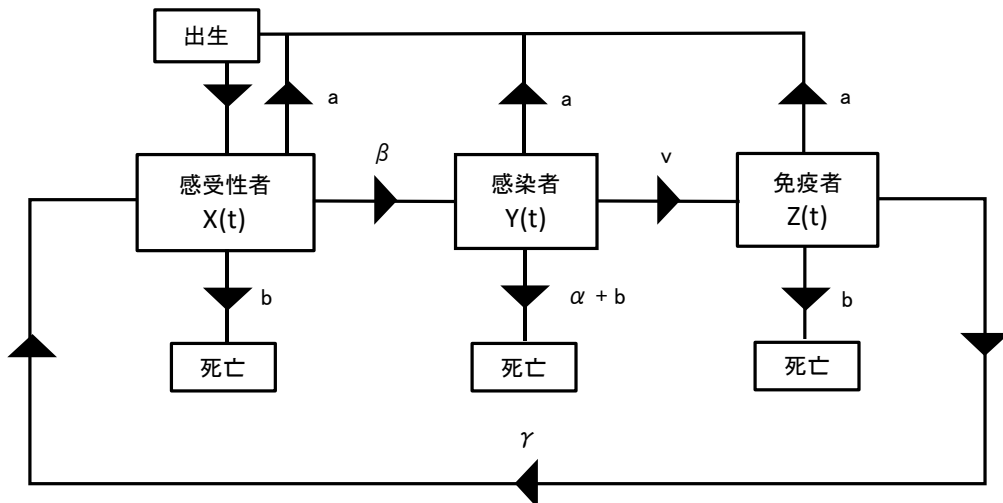
① 式は感染症にかかる可能性のあるひとの数  $X$  がどう変化するかを表しています。出生率

$a$  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  $\beta$ 、増加要因は免疫の喪失  $\gamma$  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 ( $\beta$ )、感染による死亡  $\alpha$ 、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  $\gamma$  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。

$$\frac{dX}{dt} = (a - b)X \quad \dots \text{④}$$

④ を  $X$  について解くと、

$$X(t) = X_0 e^{a-bt} + C \quad \dots \textcircled{5}$$

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、

$$\frac{dN}{dt} = (a - b)N - \alpha Y \quad \dots \textcircled{6}$$

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  $a$ 、 $b$ 、 $\alpha$  の三つに絞られます。中でも  $\alpha$  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、 $\alpha=0.03$ 、高いパターンとして  $\alpha=0.5$  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。

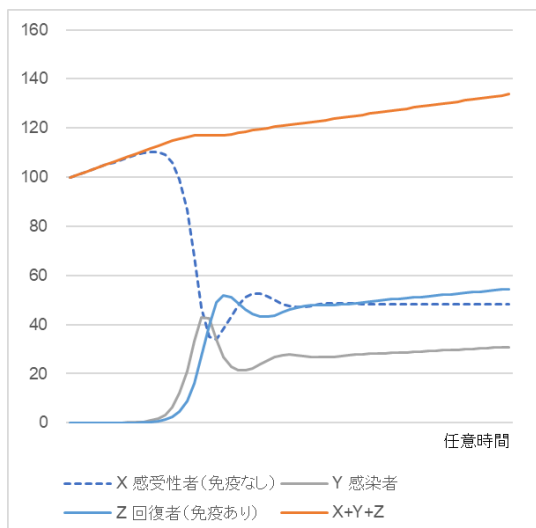
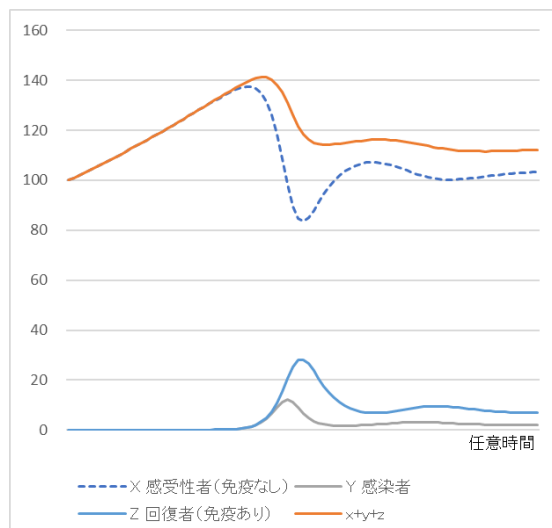
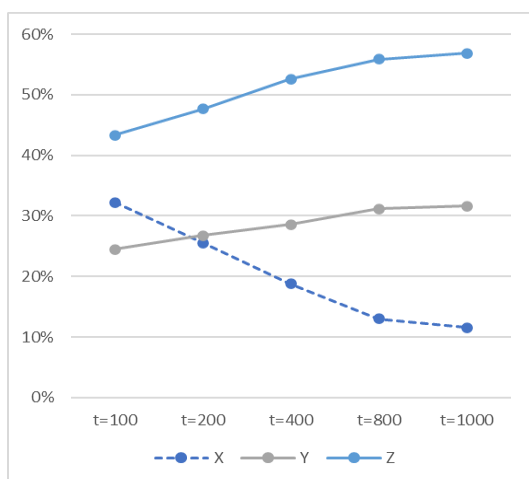
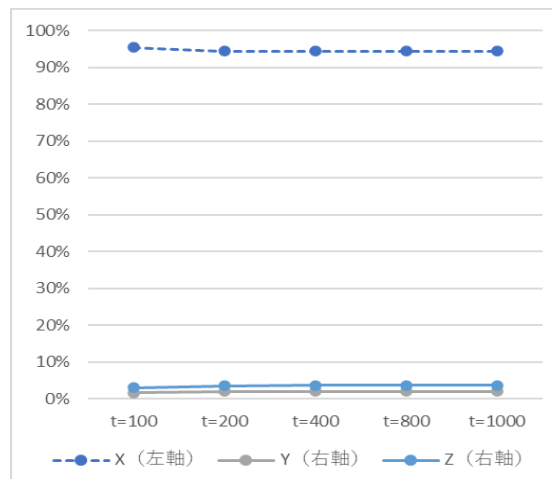
動きの中で注目すべき点があります。図 2-1 をご覧ください。伝染病が発生すると免疫をもたないひと  $X$  が感染しはじめますから、 $X$  は減少し、感染者数  $Y$  は増加します。その後、 $Y$  の中から回復者が現れることによって免疫をもつ  $Z$  の数は増加します。興味深いのはある程度時間が経過すると感染者  $Y$  と回復者  $Z$  が増える一方で、免疫をもたないひと  $X$  の増減が止まり平衡する (増えも減りもしなくなる) という点です。その結果、感受性者  $X$  の人口に対する割合は徐々に減少します。つまり伝染病にかからない人の割合が増えるということですから、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含まれてますので全員が病気に苦しんでいるわけではありません。

一方、感染致死率  $\alpha$  が高いと、人口は減少に転じます。ここで興味深いのは、感染致死率  $\alpha$  が高いと、免疫獲得者の割合が低くなってしまふという現象です。図 3-2 をご覧ください。 $\alpha=0.03$  のときは免疫獲得者が六割近くに達しているのに、 $\alpha=0.5$  では 3%程度に留まっています。②式より、感染致死率  $\alpha$  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が必要だということです。

表1

出生率	a	0.25	0.25
感染係数	$\beta$	0.02	0.02
感染致死率	$\alpha$	0.03	0.50
免疫喪失率	$\gamma$	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 ( $\alpha=0.03$ )図 2-2 ( $\alpha=0.50$ )図 3-1 ( $\alpha=0.03$ )図 3-2 ( $\alpha=0.50$ )

<他の係数が気になる方へ>

感染係数  $\beta$  : 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  $\gamma$  : 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  $\nu$  : 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

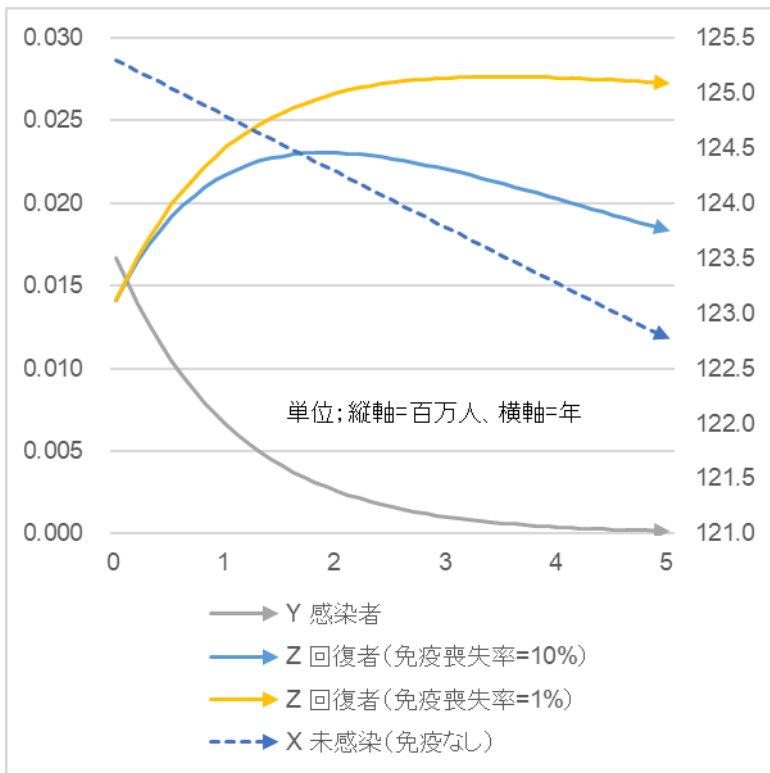
では、上記の計算方法を使って今後の日本の状況を予測してみましょう。新型コロナウイルスの感染者数、死亡者数、回復者数は厚労省から公表されている 2020 年 5 月 28 日現在の数字としています(参考資料1)。出生率と自然死亡率は厚労省の人口動態調査(令和元年、参考資料2)に依ります。免疫喪失率についてはデータがありませんので 1%と 10%の二通りで計算しました。高い方を 10%にしたのは、新型コロナウイルスは一度陰性になっても再度陽性になることがあると報道されているためです。日本の人口は総務省のホームページ(2020 年予測)を参照しました。

表4

出生率	$a$	0.007	厚労省の人口動態調査(令和元年、参考資料2)
感染係数	$\beta$	$1.6683 \times 10^{-4}$	PCR検査陽性者数(参考資料1)の人口比
感染致死率	$\alpha$	0.052	死亡者÷PCR検査陽性者(参考資料1)
免疫喪失率	$\gamma$	0.1 or 0.01	仮説
自然死亡率	$b$	0.011	厚労省の人口動態調査(令和元年、参考資料2)
回復率	$\nu$	0.848	退院または療養解除者数÷PCR検査陽性者数(参考資料1)
$x$ の初期値	$X_0$	125.294	現時点での日本の人口(百万院、総務省予測)
$y$ の初期値	$Y_0$	0.01668	現時点の感染者数(百万人、参考資料1)
$z$ 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、参考資料1)

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のある感受性者  $X$ (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およそ25万人(125百万人 × 0.2%) となります。これは現状の回復者1万4千人のおおよそ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)を現状の20倍にしてみましょう。表6をご覧ください

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

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)には世界で5億人が感染し5千万人が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(進化)していることが原因と推察されています。(参考資料3)。

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。これらを同時に経験した我々稀有な世代は後世に警鐘を鳴らすべき立場にいるのかもわかりません。今後行われるであろう調査や検査データを計算式に取り込むことによってキーとなるパラメーターも同定できるようになるでしょう。そうすれば、感染拡大を現実的にシミュレートすることができ、説得力のある政策決定に寄与できるようになると思われます。

おわり



<参考資料1>

	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、2020年5月28日現在。

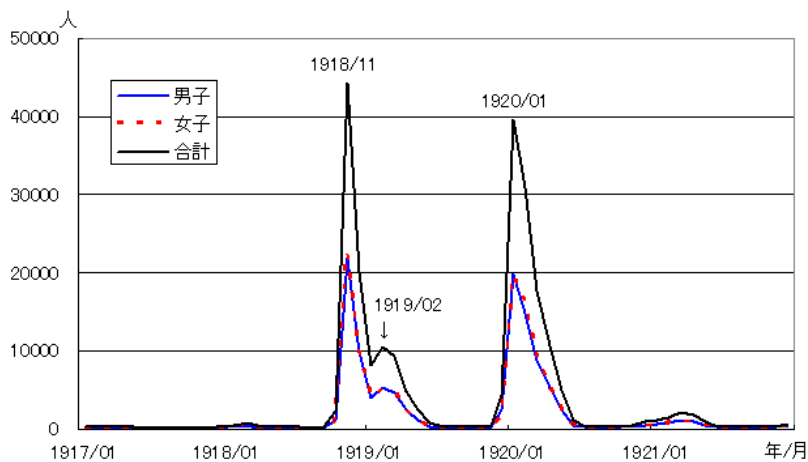
<参考資料2>

人口動態総覧，前年比較

	実 数 (人、胎、組)			率 <sup>3)</sup>	
	令和元年 <sup>1)</sup> 推計数(A)	平成30年 確定数(B)	差(A)-(B) <sup>2)</sup>	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

<参考資料3>



東京都健康安全研究センター年報 56, 2005