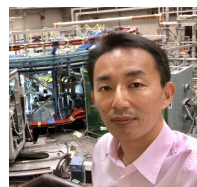


## 電子回路シミュレータで解く感染症モデル (その1) ～ SIR モデルを解こう ～

門 信一郎 (京都大学エネルギー理工学研究所)<sup>1</sup>

神田 峻彦 (電源装置メーカー勤務)<sup>2</sup>



### 1. はじめに

2019 年末、中国湖北省武漢で発生した新型コロナウイルス（後に COVID-19 と命名）は世界的な猛威を振り[1]、パンデミック（世界的大流行）となっています[2]。

国内でも、専門家会議[3]が立ち上がり、疫学と数理モデルの立場から施策への提言がなされました。その中で、感染症の流行において重要となる「基本再生産数： $R_0$ 」「実効再生産数： $R$  または  $R_t$ 」などの概念を、一般市民も目にすることが多くなってきました。

筆者（門）の前著「この感染は拡大か収束か：再生産数  $R$  の物理的意味と決定」[4]において、ケルマック・マッケンドリック(Kermack-McKendrick)の「SIR モデル」として知られる最も単純な感染症の数理モデル（以下感染症モデル）で、これらの物理的意味づけと、施策、行動変容の考え方について述べました。様々な人たちが独自の評価指標や将来予測を提示する例が増えてきた一方、モデルにおける用語や評価過程に対する誤解や混乱も目にするようになってきました。

そこで、本稿では、この感染症の拡大・収束を記述する**微分方程式**の「意味」をより多くの方々に知っていただくことを目的に、**疫学とは別の視点**から感染症モデルの結果を再現してみることになりました。

**微分方程式**がよく使われる分野に「**電子回路**」があります。コイルやコンデンサは電流の時間変化（微分）に比例した電圧を発生するので、回路の方程式はまさに微分方程式です。高等学校の「物理」で学んだ方も多いでしょう。

**もし、電子回路を感染症モデル（例えば SIR モデル）の微分方程式と同じ方程式を表すように実装できれば**、モデルの「中身」や式の意味を気にすることなく、「一つの機能」と考え、入力と出力で感染症モデルを再現することができるでしょう。

その意味で、本稿は、電気電子系や制御工学の方々や、電気回路が好きな方々に特に親しんでいただけるように感染症モデルと電子回路の関係について記述することを試みました。また数理モデルや疫学を専門とする方々には、別の分野からの一つの視点を提供できれば幸いです。

本稿「その1」では、「電子回路シミュレータ」を用いて、SIR モデルを再現することを試みました。第3章以降は、電子回路シミュレータを紹介し、簡単な例をもとに身近に感じていただくことを意図しました。回路シミュレータのソースファイルは本稿のリンクから提

<sup>1</sup>写真左：京都大学理学部卒。九州大学大学院総合理工学研究科修了。博士（工学）。核融合科学研究所、東京大学を経て2013年2月より現職（宇治キャンパス）。専門：プラズマ理工学、核融合学、プラズマ計測、分光学。科学教育。趣味：ピアノ。囲碁。元フィギュアスケート選手。

URL: <http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/complex/> SNS: <https://twitter.com/plasmankado>

<sup>2</sup>写真右：日本工業大学工学部電気電子工学科卒、日本工業大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了、修士（工学）。電源装置メーカーに勤務、電子回路の設計を担当、現在に至る。趣味：電子工作、プログラミング。 SNS: <https://twitter.com/AKIBAJIN>

供しています（公開時時点）ので実際に使ってみられると、より具体的な感触がつかめると思います。

続編となる「その2」[5]では、実際の日々の新規感染者や発症者の計数データを用いて、実効再生産数  $R_t$  を求めます。

## 2. 感染症モデルの概略 I 「SIR モデル」

### 2-1) 本稿で扱う「感染症モデル」の概略

ここで、本稿であつかう感染症モデルの概要と注意点を述べておきます。

人口一定の「閉じた空間」（いわゆる「3密」[3]の密閉空間ではなく、人の出入りを考えないモデル上の領域のこと）、感受性人口  $S$  (Susceptible: 感染する可能性のある人)、現有感染者数  $I$  (Infectious: 感染して病気になった人、あるいは  $S$  に感染させる可能性がある人)、回復数  $R$  (Recovered/Removed: 回復または隔離された人) の3つ状態の人口  $S(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$  の時間変化を追いかけます。

前著[4]では「快復」と書きましたが、「回復」が一般的に使われてきてますので、本稿ではこちらを使います。ここでいう「隔離」とは治癒による（終生）免疫獲得または死亡であり、物理的な隔離を意味しません。 $[R]$  から  $[S]$  に戻ることを想定しないからです。ですが、短期の施策においては、隔離をあらわに含めても一般性を失いません。全人口  $N = S(t) + I(t) + R(t) = [\text{一定}]$  で、転出・転入・この感染以外による死亡は考えない、いわゆる局所モデルです。

方程式の詳細は前著[4]を参照ください。式のみ再掲すると

$$\begin{aligned}\frac{dS(t)}{dt} &= -I(t)S(t)\beta \\ \frac{dI(t)}{dt} &= I(t)S(t)\beta - I(t)\gamma \\ \frac{dR(t)}{dt} &= I(t)\gamma \\ N &= S(t) + I(t) + R(t)\end{aligned}\tag{1}$$

とかけます。 $\beta$  は感染確率 ( $S$  や  $N$  と掛けたもの、すなわち  $S\beta$  や  $N\beta$  は感染の時定数の逆数)、 $\gamma$  は回復率（時定数の逆数）です。

基本再生産数  $R_0$  (アールノート; Basic reproductive/reproduction number) は、

$$R_0 = \frac{N\beta}{\gamma}\tag{2}$$

で定義され、 $R_0 < 1$  なら  $[I]$  は指数関数で減衰するので感染は収束トレンドへ、 $R_0 > 1$  なら指数関数的（等比級数的）に感染が爆発します（感染初期なので  $N = S$ ）。時間がたって、 $[S]$  が減ったり、 $\beta$  が減ったりした状態は、実効再生産数 (effective reproductive/reproduction number) と言われ、式(3)のように表します。記号は  $R$  や  $R_t$  が用いられます。前著[4]では実効再生産数の表記に  $R$  を使いましたが、本稿では専門家会議[6]の用例にあわせ、 $R_t$  を用います。

$$R_t = \frac{\chi N\beta(1-c)}{\gamma} < 1\tag{3}$$

ここで  $c$  (効果率) は、各種の施策や介入、個人の防護、将来的にはワクチン接種等によって、感染確率  $\beta$  をどの程度減らせたか、その効果の割合を表します。つまり、 $\beta$  が  $(1-c)\beta$  に抑えられる、と解釈できます。 $\chi = S/N$  は免疫非獲得率で、 $\chi N$  はこれから感染する可能性がある人の数  $[S]$  そのものです。

感染の収束には、まずは実効再生産数  $R_t < 1$  を目指すことが必要条件で、さらに、医療体制の容量 (surge capacity) に応じて、さらに低い値を目指します。実際、我が国の目標値は、**仮定値  $R_0 = 2.5$  からの 8 割削減**が 2020 年 4 月 22 日に専門家会議から提言[6]されましたので、 $R_t < 0.5$  であったことがわかります。

## 2-2) 「単純な SIR モデル」の限界と注意点

単純な SIR モデルの限界としては

1. 人の流れや出生、死亡を無視した「閉じた系」であり、収束は集団免疫の獲得によること。
2. 感染確率を表す  $\beta$  は様々な接触を**平均化**したものであり、感染機会の場面場面での強弱などは反映されないこと。
3. 回復・隔離の速度 (レート) を表す  $\gamma$  は  $[I]$  が  $[I]$  でなくなる割合であり、これは実際には各集団における感染者の隔離方針などの施策に依存しないとは言えないこと (ただし、自然治癒に限ればほぼ共通と仮定するは妥当でしょう)。
4. 潜伏期間、不顕性感染、免疫の喪失などは考慮されていないこと。
5. 年齢差、男女差なども (とりあえずは) 無視していること。

などが挙げられます。ですので、感染爆発から収束まで長期を要する新型コロナ肺炎のような感染症に対し、単純な SIR モデルを長期的な将来予測に用いる場合は、特に注意が必要です。

集団免疫獲得の判定は大きな誤解のもとであり、新型コロナ肺炎においても、集団免疫獲得を目指して死亡率が極端に増えてしまったり[7]、すでに抗体を獲得しているのでは、との憶測が出たりもしました。

前著[4]では  $\gamma$  として現有感染者 (発病患者) の「半減期」を用いることを提案し、中国のそれを用いました。現有感染者が一定になっている時は、日々の感染者と回復者が等しくなっているので、実効再生産数は 1 です。したがって、そのときの  $\gamma$  は、**実効的 (仮想的) な感染者の再生産の時定数を反映**していると仮定しました。その意味で、筆者 (門) は「**単純モデルによる**」**実効再生産数**とことわるようにしていました。まずはこの単純モデルを電子回路シミュレータで再現してみましょう。

## 3. 電子回路シミュレータ

### 3-1) LTspice

アナログ回路を扱う電子回路シミュレータはオームの法則、キルヒホッフの法則に基づき、受動素子、能動素子の物理的な特性を利用して、電圧、電流の過渡現象、周波数応答など様々な現象を演算することができます。ここで「応答」という言葉は、ある機能を持つ「箱 (ブラックボックス)」にと出力があるとして、入力に対して、どんな出力が得られるか、これをその「箱」の「応答」と呼びます。周波数応答とは、入力信号の周波数特性が出力信号でどう変わるかという「応答」です。

本稿では、**SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)** という 1973 年にカリフォルニア大学バークレー校で開発されたソフトウェアから派生し、アナログ・デバイセス社 (旧リニアテクノロジー社) で開発された **LTspice [8]** というソフトウェアを使用します。2020 年 6 月現在のバージョンは Windows 7、8、10 用 LTspice XVII、Mac OS X10.7+用 LTspice XVII for OS X です。

SPICE の仕組みを簡単に説明すると、ネットリストと呼ばれる各素子の結線情報と、部品の電気的特性データをもつモデル・ライブラリをもとに、電子回路を行列 (= 回路方程式) に変換し、各種の演算を行います。

受動素子のインダクタ (コイル) やキャパシタ (コンデンサ) のような微分、積分にあたる演算も数値積分法により実現します。LTspice はスイッチング・レギュレータ回路 (電子素子だけで電圧を変換する変圧器の回路) のシミュレーションを目的に作られており、数値積分をする際にスイッチング波形のような急峻な変化を捉えられるよう工夫がなされています。

筆者 (神田) が考える LTspice の利点は

- 無料で扱えること、
- 部品やノード数に制限がないこと、
- 使用にあたり難しい設定を必要としない

などが挙げられます。

### 3-2) アナログコンピュータ

アナログ電子回路シミュレータが微分項を含んだ回路方程式 (すなわち微分方程式) を過渡解析する場合は、数値解析にて演算を行います。インダクタやキャパシタのような微分要素が混ざった微分方程式の場合は、数値積分演算を行います。

まだ今日のようにデジタルコンピュータが発達していなかった頃、物理現象を用いて微分方程式を解く計算機がありました。これは、**アナログコンピュータ[9]**や**微分解析機**などと呼ばれていました。

本稿で扱うのは電気信号で演算を行う、いわば**電子式のアナログコンピュータ**です。

アナログという連続量を用いた計算機の歴史は古く、有名なところで**アンティキティラ島の歯車**があります。これは天体の動きを複数の歯車を用いて模擬したアナログ計算機と考えられています。実は、LTspice (Windows 用 LTspice XVII) を起動したときに現れる背景画像は、その歯車のイラストになっているのです (図 1(a))。

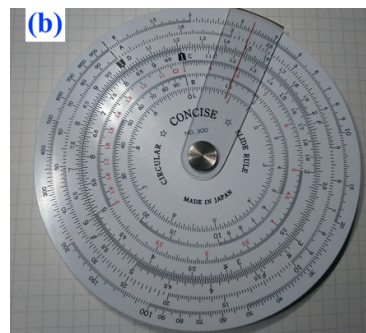
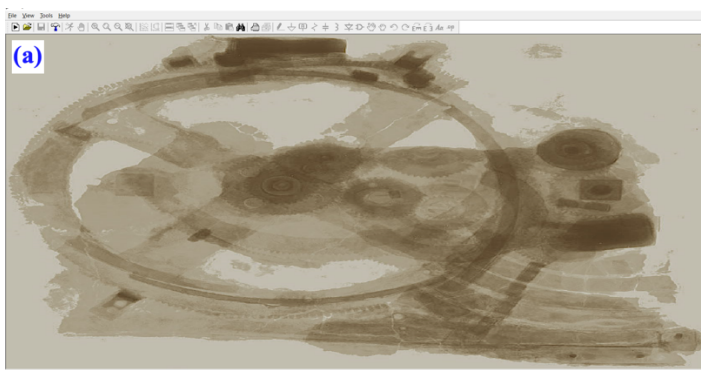


図 1(a) Windows 用 LTspice の起動後の画面。デフォルトの背景はアンティキティラ島の歯車。  
(b)円型の計算尺。

ジョン・ネイピア(John Napier)が  
1614 年に対数の概念を考案し、1632  
年にウィリアム・オートレット

(William Oughtred) が固定尺と滑尺  
とよばれる 2 つの定規に対数の目盛を割  
り当てることで、乗算除算を可能にした  
計算尺が発明されました。図 1 (b) は円  
型の計算尺で、現在でも購入できる計算  
尺のひとつです。円型計算尺の場合、角  
度という連続量に対し、乗算除算、平方  
根や三角関数など割り当てることで計算  
を実現しています。

微分方程式を解くことができる**微分解  
析機**と呼ばれる機械式アナログコンピュ  
ータが発明されたのが 1876 年で、実用  
的な計算機は 1928 年から 1931 年にか  
けてマサチューセッツ工科大学のヴァネ  
ヴァー・ブッシュ(Vannevar Bush)らに  
より開発されました。この**ブッシュ式微分解析機**は東京理科大学の近代科学資料館にて動態  
保存されており、日本国内で唯一現存する微分解析機です(2020 年 6 月現在ではリニューアルのため休館中) [10]。ちなみに**デジタル回路**を生み出した**クロード・シャノン**

(Claude Elwood Shannon)はブッシュの教え子でした。

アナログコンピュータの構成要素として必要だったのが高い入力インピーダンス、高いゲインの増幅回路です。これが今日に伝わるオペアンプ(演算増幅器)の原型になっています。数値演算としてはほとんどデジタルコンピュータに取って代わられてしまい、かつてのようなアナログ回路で行うことはほぼなくなってしまいました。しかしアナログコンピュータは信号増幅や周波数フィルタ処理、フィードバック制御など、形を変えて使われ続けています。

### 3-3) アナログコンピュータの構成要素[11]

アナログコンピュータで微分方程式を解くための構成要素を図 2 に示します。

簡単な微分方程式を解くだけであれば図 2(a)~(c)の係数器、加算器、積分器の 3 つの要素で十分ですが、本稿ではそれに加え、図 2(d)の乗算器を用います。

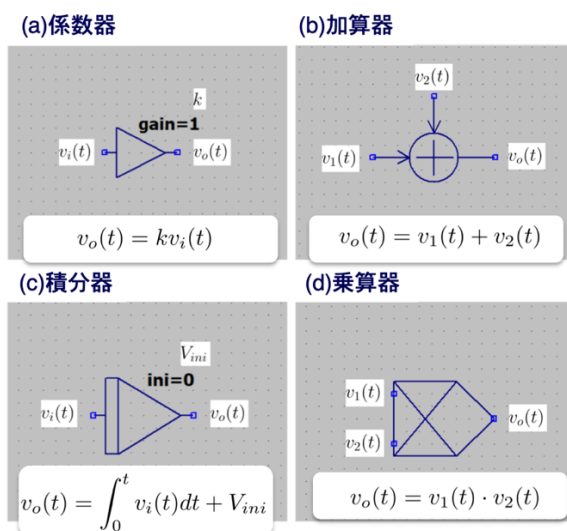


図 2 (a)係数器。入力された電圧に対し、定数倍する回路。(b)加算器。2 つ以上の電圧の加算値を出力する。(c)積分器。入力された電圧に対し、時間積分した電圧を出力する。(d)乗算器。2 つの入力電圧に対して乗算する

## 4. 簡単な例 ～運動方程式を解く～

まずは「小手調べ」に、図 3 に示すボールの鉛直投射をシミュレーションしてみましょう。ニュートンの運動方程式  $F=ma$  ( $m$ :質量、 $a$ :加速度) に当てはめると、 $g$  を重力加速度 ( $=9.8 \text{ m/s}^2$ ) として

$$ma = -mg \quad (4)$$



と書けることは高等学校の物理基礎で学びます(ね?)。両辺を  $m$  で割り、加速度は位置座標  $y$  の2階微分であることを考慮すると、

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -g \quad (5)$$

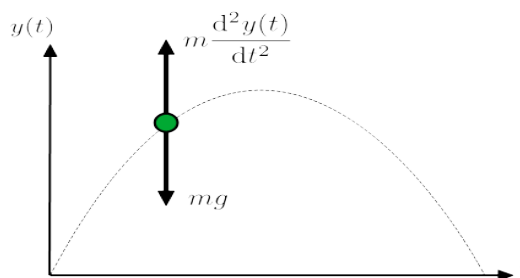


図3 ボールの投げ上げ運動の  $y$ - $t$  グラフ。  
横軸方向は時間  $t$ 。  $y$  方向は高さ。

です。これをアナログコンピュータで解くには図4に示す手順に従います。

時刻3秒までシミュレーションをおこなってみます(過渡解析)。例えば高さ1mを電圧1Vとして直読するようにします(好きに作れます)。設定画面を図5に示します。

結果を図6に示します。横軸は時間[秒]、縦軸は電圧(すなわち高さ)です。このようにグラフ表示もソフトウェアがやってくれます。さらに、この出力の数値データをファイル出力し、別のソフトウェアで解析することも可能です。

いかがでしょうか。簡単な回路構成で、しかも一度回路を作ってしまうと、初期値をその場で変えるだけでシミュレーションできる、専用のコンピュータとなるのです。

## 5. SIR モデルへの適用

### 5-1) 物理量との対応条件の設定

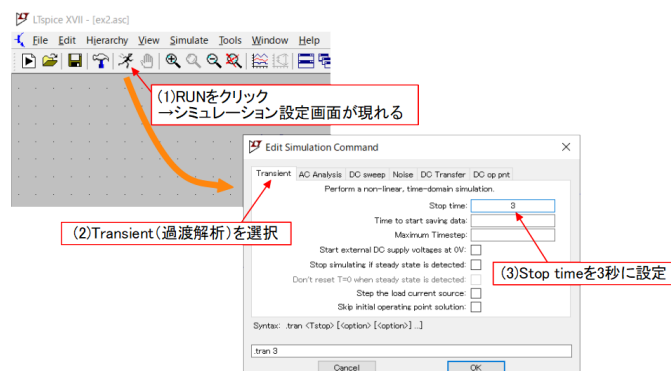


図5 本章の運動方程式を解くためのLTspice (Windows 用) の設定例。Mac 用は設定画面への入る操作が若干異なる。

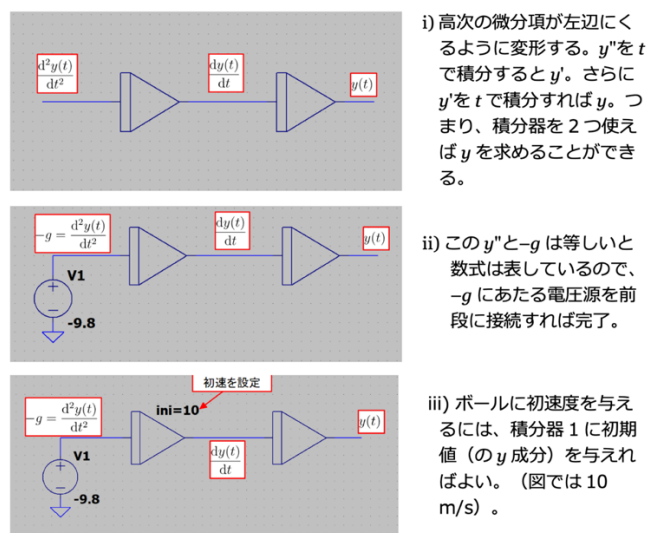


図4 運動方程式の実装手順。

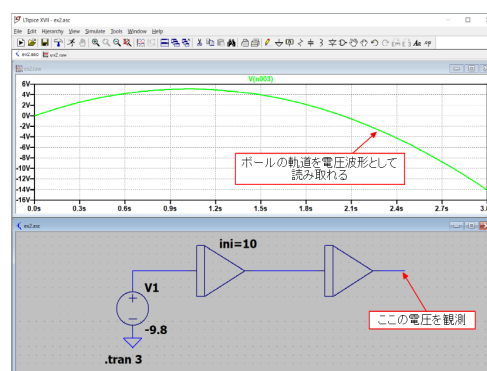


図6 演算結果。ボールの軌道を電圧波形として読み取れる。

前項の手順にしたがって、SIR モデルの回路シミュレータへの実装をしてみましょう。電圧 1 V を 1 人と割り当て、シミュレーション時間 1 秒を現実の 1 日に割り当てます。東洋経済オンライン[12] より発表されている新型コロナ感染症のデータをもとに、 $S(t)$ 、 $I(t)$ 、 $R(t)$ を物理量と対応させ、初期値を設定しました。

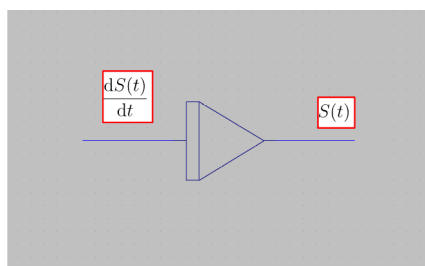
$S(t)$  : 感受性人口 (これから感染する可能性のある人の数)  
 $I(t)$  : 現有の感染者数 (人に感染させる可能性のある人)  
 $R(t)$  : 除去者 = 退院者+人工呼吸器又は集中治療室に入院している者+死亡者  
 $S(0) = 1$  億人 (=100 MV)      日本のおおよその総人口  
 $I(0) = 16$  人 (=16 V)    2020 年 2 月 6 日時点の PCR 検査陽性者の累計値  
 $R(0) = 0$  人 除去者の初期値

## 5-2) $S(t)$ を解くアナログコンピュータの構築

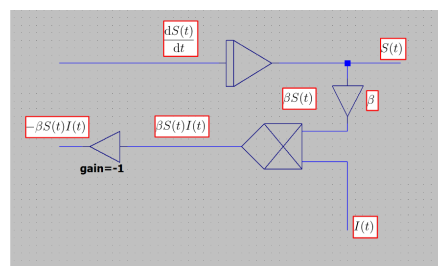
前章と同様に、アナログコンピュータを構築しましょう。連立微分方程式なので、複数の方程式を接続することになりますが、まずは 1 つ目の方程式の作り方を図 7 に順を追って示します。

残りの  $I(t)$ 、 $R(t)$ の部分も構築して、和には加算器をつかって、図 8 のようにお互いを接続します。

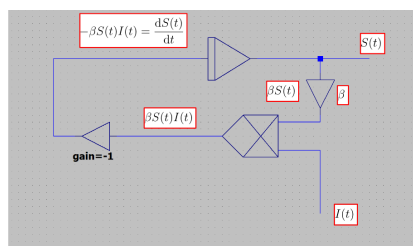
いよいよ、計算に移ります。 $\beta$  と  $\gamma$  は東洋経済オンライン[12] より発表されているデータの 2020 年 2 月 6 日～2020 年 4 月 7 日のデータを基に決定しました。決定には、付録 A に示した「粒子群最適化」という手法を用いました。実測値に合うような複数の変数の組み合わせを探索する一つの方法です。決定した値を以下に示します。



i)  $dS(t)/dt$  の積分は  $S(t)$ なので、積分器は 1 つで



ii)  $-\beta S(t)I(t)$ の部分までを構築すると上のようになります。積は乗算器を使います。引き算するには係数器で-1 倍して加算します。



iii) 式(1)の第 1 式は  $dS(t)/dt$  と  $-\beta S(t)I(t)$ は等しいと言っているの、係数器の出力を積分器の入力に戻せば完成です。

図 7 SIR モデルを演算するアナログコンピュータの構築手順

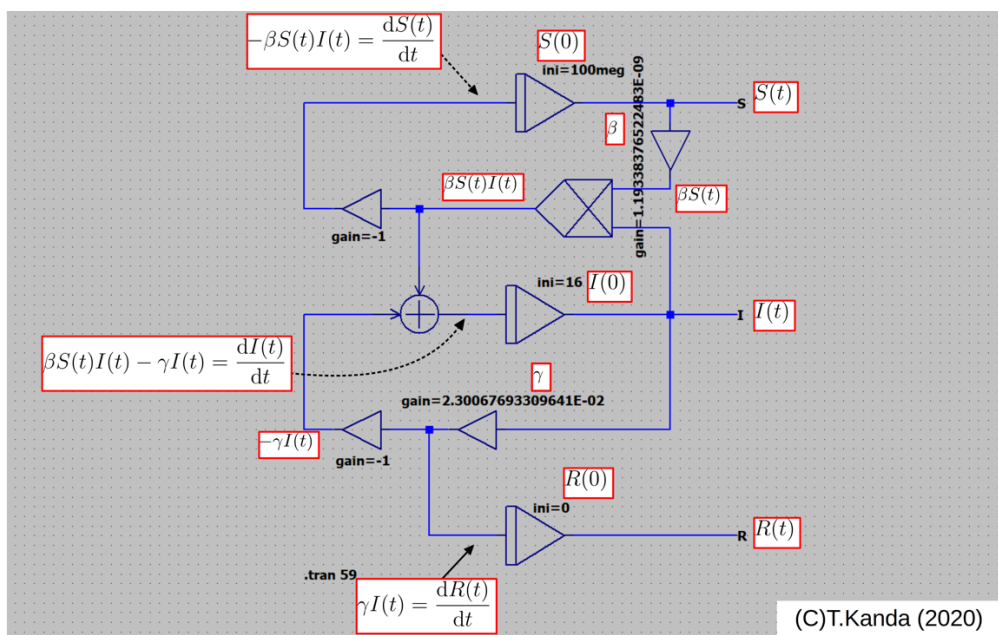


図8 SIRモデルを演算するアナログコンピュータ完成図

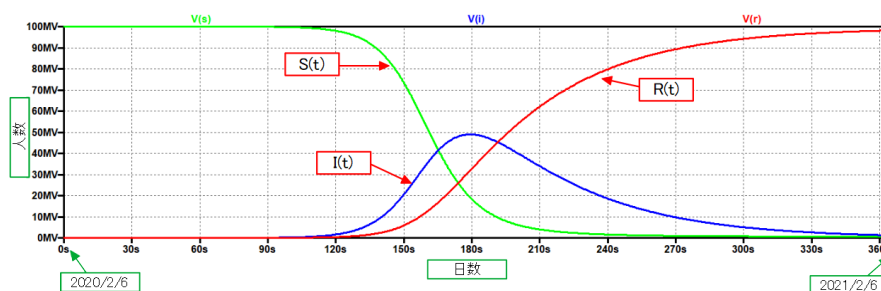


図9 アナログコンピュータによる SIR モデルの計算結果

$$\begin{aligned}\beta &= 1.19338376522483 \times 10^{-9} \\ \gamma &= 2.30067693309641 \times 10^{-2}\end{aligned}\tag{6}$$

(桁は有効桁数を気にせず目一杯示しています。)

少し注意いただきたいのは、少ないデータから  $\beta$  と  $\gamma$  を同時に決定する場合は、両者のバランスで最適値を探すので、両者の現実の物理量を反映するとは限らない点です。

求めた  $\beta$  と  $\gamma$  を用いて解いた SIR モデルの解 ( $S$ 、 $I$ 、 $R$  の時間変化) を図 9 に示します。いかがでしょうか。全貌がみえてきたのではないのでしょうか。SIR モデルによる計算でよく見かける図を再現することができました。これをもとに、いろいろな状況を想定した計算が可能です。

### 5-3) 行動変容の組み込み

感染拡大防止のために、専門家会議が 2020 年 3 月 19 日に提唱した「行動変容」[6]は、ある時刻以降、接触機会×感染確率 ( $S\beta$ ) を  $S\beta(1-c)$  に低減することを意味します[4]。  $c$  は式(3)で述べた効果率(efficacy)で、自粛、マスク、ソーシャルディスタンス(いわゆる 3 密(密閉・密集・密接)を避ける)などの予防措置、あるいはワクチン接種、都市封鎖(ロックダウン)などの介入を含めた総合的な値です。



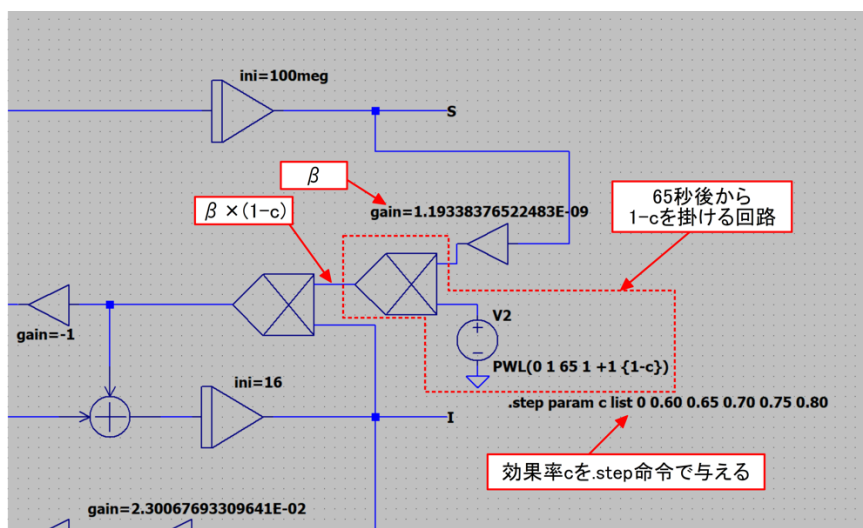


図 10 効果率  $c$  を考慮し、 $(1-c)$  を乗ずる回路（赤点線の囲み部分）を追加

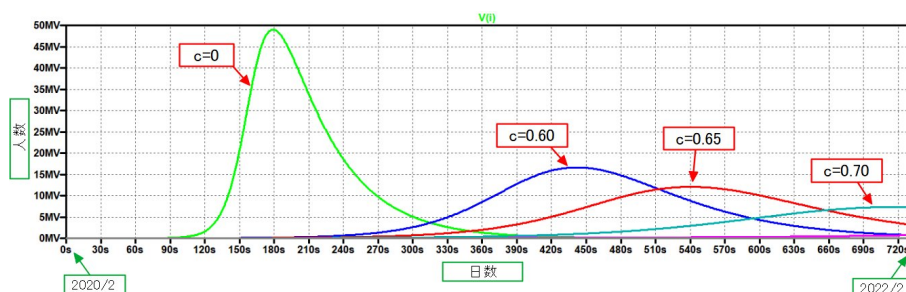


図 11 自粛などの行動変容によって  $\beta \rightarrow \beta(1-c)$  としたときの現有感染者数  $[I]$  の経時変化。60%削減、65%削減、70%削減によって現れる効果の違いがわかる。

効果率  $c$  を与えるには、図 10 のように係数器  $\beta$  のあとに  $(1-c)$  を乗ずる回路を設けます（ $S$  はそのままにして、効果を  $\beta$  に帰着させていることになります）。係数器で直接定数を与えてもよいのですが、LTspice には任意の定数を変化させることができる「step」という命令がありますので、乗算器を用いて与えます。具体的には、ある時刻から  $1-c$  を乗じたいので、電圧源  $V2$  から任意の波形を与えられるようにします。

結果を図 11 に示します。行動変容によって、ピークを下げ、長丁場（長期戦）にもつれ込んでいく様子が再現できていると思います（この戦略で体制を整え、医療崩壊を防ぎます [4]）。

電圧源には任意の波形を与えられるので、図 11 のように自粛をし続けるのではなく、一定期間のみ  $c$  の効果を入れることも可能です。

例えば緊急事態宣言やロックダウンなどの行動の自粛要請は一定期間のみであり、解除された場合は元の行動にもどると考えられます。このように一定期間だけ自粛するとどうなるかをみてみましょう。

図 12 に効果率  $c$  の時間波形、およびその  $c$  を用いた場合の現有感染者  $[I]$  の動向を示します。「**人との接触機会を 8 削減らす**」[6]とは、 $c$  の値が 0.8 となるように防護策をとり、結果、感染率を 20%に抑えることを意味します。 $\gamma$  の値は固定ですので、**実効再生産数を 5 分の 1 にしよう**、とする目標設定とも言えます。

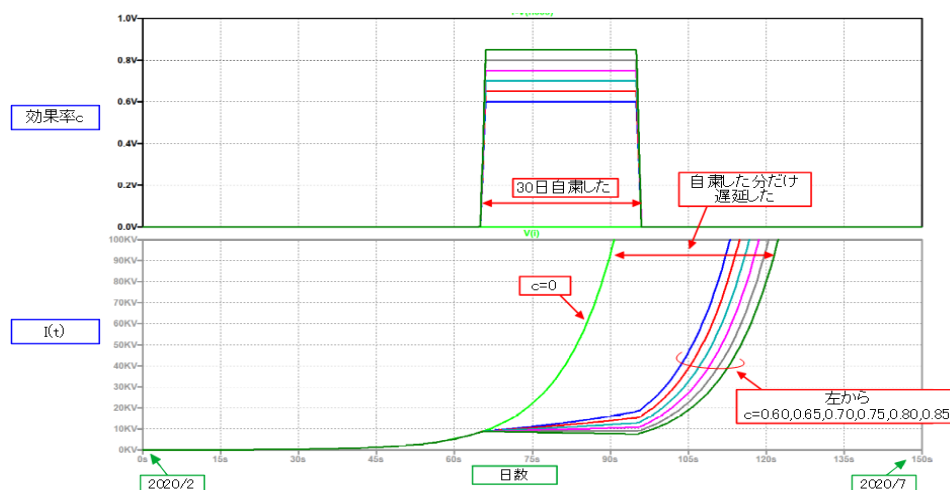


図 12 一定期間のみ効果率  $c$  を乗じた場合の現有感染者  $[I]$  の経時変化

## 6. 「その1」 まとめ

繰り返しになりますが、重要なことは、本稿にシミュレーションした SIR モデルは、日々や場所によって大きくかわる接触機会や隔離率をすべて一定としますので、将来予測には使えません。集団免疫獲得の予測に使うのはとりわけ危険でもあります。さらに、実効再生産数としていくつを目標に設定するかは、地域の医療体制の容量にも大きく依存することを忘れてはいけません。あくまで、行動変容の指針や評価を検討する際の一つのツールとして扱うのが適切に思います。

とはいえ、このような演習的なシミュレーションを通じて、少しでも多くの方々に感染症の数値モデルの「見方」「考え方」を知ってもらうことは、専門家会議による提言や政府の施策をより正しく判断する有用なリテラシーを与えるものであると信じます。

「その2」[5] では、より実用的な観点から実効再生産数  $R_t$  を電子回路シミュレータで求める手法を紹介します。実際に公表されている日々の感染者数のデータに適用することが可能です。

(その2 [5]へ続く)

### 参考文献・サイト：

[1] アメリカ CDC、COVID-19 のページ：<https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-nCoV/index.html>  
(2020.3.18 閲覧)

[2] “WHO Director-General’s opening remarks at the media briefing on COVID-19 – 11 March 2020”, <https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19—11-march-2020>

[3] 新型コロナウイルス感染症対策専門家会議：<https://ja.wikipedia.org/wiki/新型コロナウイルス感染症対策専門家会議> (2020 年 6 月 22 日閲覧)

[4] 門 信一郎：この感染は拡大か収束か：再生産数  $R$  の物理的意味と決定, RAD-IT21 WEB マガジン (2020.03.27) [https://rad-it21.com/サイエンス/kado-shinichiro\\_20200327/](https://rad-it21.com/サイエンス/kado-shinichiro_20200327/)

[5] 門 信一郎、神田 峻彦：電子回路シミュレータで解く感染症モデル「その2～実効再生産数を求めよう～」 [https://rad-it21.com/サイエンス/kado-shinichiro\\_202007\\*\\*\\*/](https://rad-it21.com/サイエンス/kado-shinichiro_202007***/)

[6]「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」(2020年4月22日)

[https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000121431\\_00093.html](https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000121431_00093.html)

[7] BBC ニュース - 【解説】 なぜイギリスは方向転換したのか 新型ウイルス対策

<https://www.bbc.com/japanese/features-and-analysis-51996098>

[8] アナログ・デバイセズ。ダウンロードサイト。

<https://www.analog.com/jp/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html#>

[9] アナログ計算機, Wikipedia, <http://ja.wikipedia.org/wiki/アナログ計算機>, (参照 2020-06-22)

[10] 東京理科大学近代科学資料館, <https://www.tus.ac.jp/info/setubi/museum/>, (参照 2020-06-22)

[11] 黒川一夫, 現代講座アナログ・ハイブリッド計算機, 1969年, 株式会社オーム社

[12] 東洋経済オンライン特設ページ (新型コロナウイルス国内感染の状況)

<https://toyokeizai.net/sp/visual/tko/covid19/>

## ■付録 A : 粒子群最適化

粒子群最適化[A1]は Particle Swarm Optimization の頭文字をとって PSO とも呼ばれています。これは鳥や魚の群れが群れの中で情報を共有しあい、もっとも良い餌場を探す様子を模擬したメタヒューリスティクスアルゴリズム(組み合わせ最適化問題における発見法的な解決手法)のひとつです。

もう少し噛み砕いて説明すると、「ある値とある値の間が良さそうだから、中間の値ぐらいの定数で試してみよう」とやりながら回路の調整をしている行為を行っているといえイメージが付きやすいかと思います。**求めたい数値の組み合わせというのを粒子の座標という形で表し、複数の粒子を式(A1)、式(A2)の制御式に従って変化させ、最適解を見つける手法**になります。

$$\mathbf{v}_k(t+1) = w\mathbf{v}_k(t) + c_1r_1\{\mathbf{pbest}_k - \mathbf{x}_k(t)\} + c_2r_2\{\mathbf{gbest} - \mathbf{x}_k(t)\} \quad (\text{A1})$$

$$\mathbf{x}_k(t+1) = \mathbf{x}_k(t) + \mathbf{v}_k(t+1) \quad (\text{A2})$$

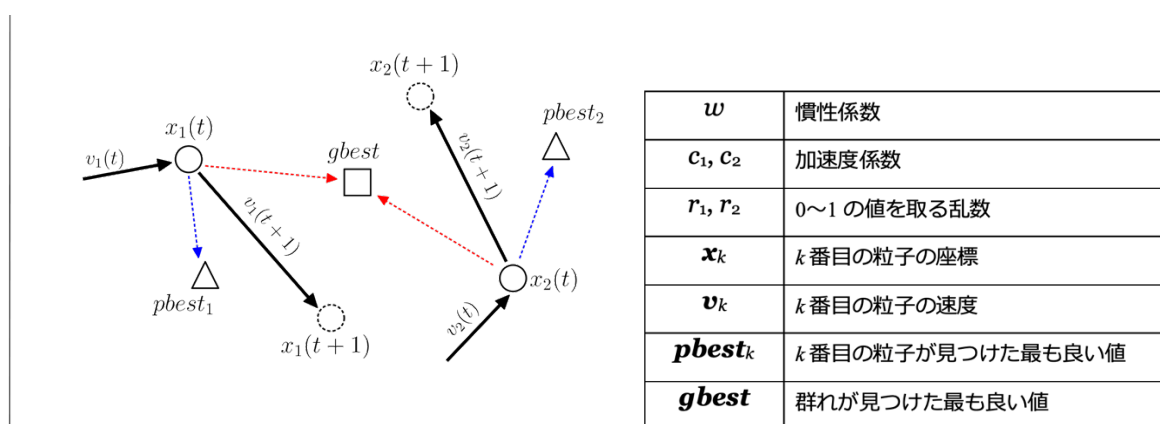


図 A 粒子群最適化(PSO)の概念図

図 A に 2 つの粒子が最適解を探し回る様子を表します。

$\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{pbest}$ 、 $\mathbf{gbest}$  をベクトルで書いたのは、求めたい数値が複数個ある=多次元空間の座標のことを意味しています。数値が  $a \sim e$  の 5 つある場合、たとえば  $\mathbf{x}$  は  $\mathbf{x} = (a, b, c, d, e)$

のようになります。粒子の数には制限はありませんが、たくさんあったほうが探索範囲をまんべんなく探索できます。

$k$  番目の粒子は  $x$  という座標情報、 $v$  という速度情報、今まで探索してきて最も良い値 ***pbest*** を持っています。また、すべての粒子の ***pbest*** を集約し、群れの中で最も良い値 ***gbest*** を決定します。

ある時刻  $t$  において、式(A1)にしたがって速度を決定し、式(A2)で次に探索する座標を決定します。この速度  $v$  は次の組み合わせの数値を決定するための変化させる量になりますが、最適解に近づいてくると、この変化量は減っていき、やがてゼロに収束していきます。自動的に最適値を探索していくアルゴリズムもありますが、本稿の解析の場合は各素子の値を座標に割り当てて、手動で変数を変えていしながら、目標の  $\beta$ 、 $\gamma$  (本稿「その1」式(6)) や伝達関数 (本稿「その2」の式(3)) に近くなるような組み合わせを探しました。

[A1] 粒子群最適化法, <https://www.msi.co.jp/s4/introduction/pso.html>, (参照 2020-04-23)

元記事 : [https://rad-it21.com/サイエンス/kado\\_kanda\\_20200714\\_1/](https://rad-it21.com/サイエンス/kado_kanda_20200714_1/)

[ 短縮 URL: <https://bit.ly/RADIT21KD2020071401> ]

( 2020 年 6 月 22 日投稿、7 月 14 日公開 )



引用 :

「門信一郎・神田峻彦：電子回路シミュレータで解く感染症モデル1, RAD-IT21 WEB マガジン (2020.07.14)」

※本稿「その1」「その2」のソースファイルは、WEB サイトから取得できます (公開日現在)

RAD-IT21 は人類の未来を「科学」(自然・社会・人文科学)を踏まえて議論することで、より有用で信頼できる「情報」と「知識」を発信する WEB マガジンです。

RAD-IT21 編集部

〒105-0001 東京都港区虎ノ門2丁目2-5 共同通信会館ビル 日本ラッド株式会社内

