

SIR モデルとモンテカルロ法による 感染症拡大シミュレーション

Simulations of spreading infection by SIR model and Monte Carlo method

齋藤敏之
Toshiyuki SAITO

1. 序論

この小論では、ある感染症が人々の間に広まっていく様子をどの程度コンピュータシミュレーションできるか確認することを目的としている。数理モデルによる研究は、古くは Kermack と McKendrick による 1927 年の SIR モデルにまで遡ることができるようである^[1,2]。その後多くの研究がなされ、現在ではインターネットでいくつもの文献を見つけることができる。拙稿では、第2章で SIR モデルを紹介し、第3章でルンゲ・クッタ法を用いてその微分方程式を解き、2020年2月に新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) がクルーズ船ダイヤモンド・プリンセス内で広まった事例と比較する。第4章では一種のモンテカルロ法を用いて、いくつかの条件のもとに感染がどのように伝播していくかをシミュレートする。なお拙稿では数的に感染が拡大する様子を計算することが目的であり、一般に関心をもたれるであろう致死率等の疫学的内容や、感染や死者数の抑止方法については言及しない。

2. SIR モデル

SIR モデルは、人々の出入りが無い閉じた環境内での感染症の流行を考えている。人々は感染症についての知識はなく、対策等は全く講じられない。医療体制は無視しており、検査による発症確認も行われない。そしてすべての人が同じように接する状況を想定している。なお感染率等のパラメータは一定であると仮定する。

人々は3つのカテゴリーに分類され、それらの人数を S, I, R であらわす。S は感受性者 (Susceptible) で、病気に感染しておらず感染する可能性のある人の数。I は感染者 (Infectious) で、病気に感染していて、感受性者にうつすことができる人の数。R は隔離された人 (Removed) で、隔離されたり死亡した人の数とする。このモデルでは感染者は必ず発症する。また R には治癒した人も含まれるべきだが、その効果は無視している。なお一度治癒した人が再感染をするようなモデルも考えられている^[3]。

μ を感染率、 λ を隔離率とすると SIR モデルは、以下の3つの連立微分方程式で表される。

$$\frac{dS}{dt} = -\mu SI \quad (1.1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \mu SI - \lambda I \tag{1.2}$$

$$\frac{dR}{dt} = \lambda I \tag{1.3}$$

以上の式を合計の人数 ($N = S + I + R$) に対する割合で書き直すことができるので (μ は μN で置き換える)、 $N = 1$ としても一般性は失われない。以下の図1と図2では $N = 1$ として計算した例を示している。

時刻 $t = 0$ における初期条件を $S = S_0 > 0$, $I = I_0 > 0$ とする。 $S, I > 0$ なら (1.1) の右辺は負になるので S は単調に減少する。したがって $t \rightarrow \infty$ のとき $\frac{dS}{dt} \rightarrow 0$ となって $S \rightarrow$ 一定値になることが予想される。(1.2) は、以下のように書き直すことができる。

$$\frac{dI}{dt} = (\mu S - \lambda) I \tag{1.4}$$

S がほぼ一定値とみなせるならば $I \propto \exp((\mu S - \lambda) t)$ のように増加・減少する。 $S > \lambda/\mu$ のとき I は増加し、 $S = \lambda/\mu$ で極大となり、 $S < \lambda/\mu$ で減少する。数値的に微分方程式を解くと、図1のようになる (左図は $\mu = 1.2$, $\lambda = 0.5$, 右図は $\mu = 1.8$, $\lambda = 0.4$, どちらも初期条件 $S_0 = 0.99$, $I_0 = 0.01$, $R_0 = 0$)

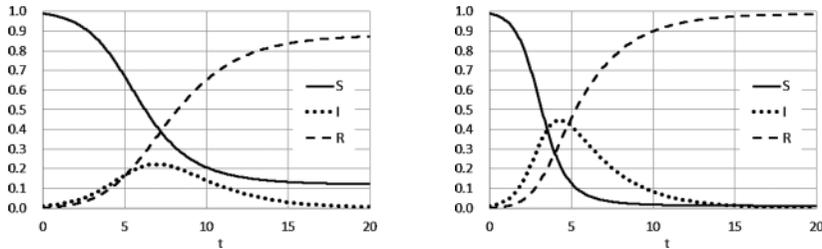


図1. 微分方程式 (1.1) ~ (1.3) の解 (パラメータについては本文参照)

また (1.1) を (1.2) で割ると、

$$\frac{dS}{dI} = \frac{-\mu S}{\mu S - \lambda} \tag{1.5}$$

となるので、この微分方程式は容易に解くことができ、

$$\frac{\lambda}{\mu} \log S - S = I + Const. \tag{1.6}$$

となる。初期条件を $S_0 + I_0 = N$, $R_0 = 0$ とすると、積分定数は

$$Const. = \frac{\lambda}{\mu} \log S_0 - N \quad (1.7)$$

となり、(1.6) へ代入して

$$\frac{\lambda}{\mu} \log S - S - I = \frac{\lambda}{\mu} \log S_0 - N \quad (1.8)$$

が常に成り立つ。つまり数値的に (1.1) と (1.2) を解いて、 S と I が求まったら (1.8) の左辺に代入し、その値が右辺に等しければ計算が正しいことが確認できる。 $t \rightarrow \infty$ で $I \rightarrow 0$ となり $S \rightarrow \bar{S}$ と仮定すると、

$$\log \bar{S} - \frac{\mu}{\lambda} \bar{S} = \log S_0 - \frac{\mu}{\lambda} N \quad (1.9)$$

を満たすので、 μ/λ と S_0 が与えられれば \bar{S} を数値的に求めることができる。 $S_0 = 0.99$, $N = 1$ として μ/λ と \bar{S} の関係を求めると図 2 のようになる。

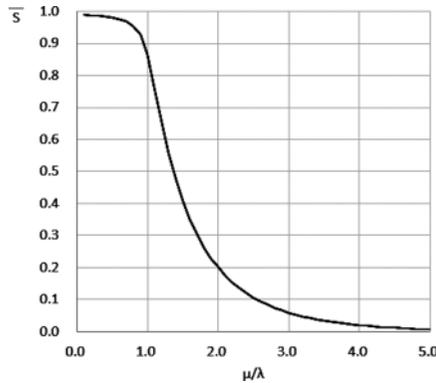


図 2. μ/λ と \bar{S} の関係 ($S_0 = 0.99$)

この図より $S_0 = 0.99$, $N = 1$ を初期条件とすると、 $\mu < \lambda$ のとき人々はあまり感染しないが、 $\mu \geq 2.5\lambda$ 辺りになると 90% 以上の人が感染することがわかる。

感染してから発症するまでの潜伏期間についてだが、このモデルでは医療体制などを無視し、発症と同時に隔離されるものと仮定しているので、感染した人が発症し隔離されるまでの時間の確率分布は $e^{-\lambda t}$ に比例する ((1.2) で $\mu = 0$ として方程式を解けばよい)。潜伏期間は t についての期待値を計算して次のように求めることができる。

$$\text{潜伏期間} = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.10)$$

3. SIR モデルによるクルーズ船での感染症拡大シミュレーション

この節では SIR モデルを実例に応用することを試みる。なお SIR モデルは、感染等が伝播していく様子をシミュレートすることが目的であるため、一般に関心もたれるであろう致死率等の疫学的内容や防止方法について拙稿では言及しない。

3-1. クルーズ船ダイヤモンド・プリンセスにおける感染症拡大の経緯

2020年2月はクルーズ船ダイヤモンド・プリンセス内で COVID-19 が広まり社会問題となった。船内は外界から隔離された環境で人の出入りがほとんど無いと考えられるため、SIR モデルの仮定がある程度理想的に成り立つと考えられる。そこで SIR モデルを用いて、厚生労働省が公開している発症者数^[4]を再現するように、諸々のパラメータを設定し、感染者数の推移を再現することを試みる。なおこの節では、「感染者数」は前節と同じ意味で用いるが、「発症者」は前節での「隔離された人」の意味で用いる。

まず、実際に起きた出来事について確認する^[5]。①クルーズ船は2020年1月20日に横浜港を出発し、鹿児島、香港、ベトナム、台湾、沖縄に立ち寄り2月3日に横浜港に帰港した。この間、1月25日に香港で下船した乗客が、2月1日に COVID-19 陽性であることが確認された。②2月3日に帰港したクルーズ船に対し日本政府は乗客乗員の下船を認めず、2月3日からの2日間、検疫官によって全乗客乗員の健康診断を行った。この時点でクルーズ船には乗客2666人、乗員1045人、合計3711人が乗船していた。5日に陽性者が確認されたことにより、14日間の検査・隔離がはじまる。③乗員乗客の健康確保の観点からリスクが高いと考えられる人から COVID-19 に対する検査を行い、陽性者は医療機関へ搬送した。厚生労働省が発表した陽性者の人数は次のとおりである。2月5日10人、6日10人、7日41人、8日3人、9日6人、10日65人、12日39人、13日44人、15日67人、16日70人、17日99人、18日88人、19日79人、20日13人、23日57人、26日14人（これらの人数には無症状病原体保有者を含む）。またこの間、乗船していた厚生労働省の職員や検疫官等からも陽性者が発生している（9人）。④2月16日15時時点で、船内に残っている乗客乗員は3282人。PCR検査陽性で医療機関へ搬送された者が355人、別の病気で入院した者が40人、付き添い等の理由が7人、指定施設へ移送された高齢者等が27人。⑤17日にアメリカ人乗客がチャーター機で帰国するために下船（338人）。⑥14日間の健康観察期間中に問題のない人の下船が、19日からはじまる。⑦3月1日に乗客乗員の下船が完了する。以上をまとめると、3711人の乗客乗員の内、陽性が確認された人の数は最終的に延べ706人となるが、3月5日に重複等を差し引いて696人に訂正される（更に発症者が増え3月28日時点712人）。⑧下船後発症が判明した人数は国内では5人。外国のチャーター機で帰国した者では、アメリカ46人、オーストラリア10人、香港9人、イギリス4人、イスラエル3人、ロシア3人、台湾1人（3月5日現在）。したがって、クルーズ船内での感染者数は700人を超える（チャーター機内での感染については不明）。

次に厚生労働省が公開している発症者数データ^[4]について説明する。このグラフには1月20日から2月18日までの発症者数が乗客と乗員について描かれている。（注：1月20日はクルーズ船が出港した日であり、健康に問題のない人の下船がはじまるのが2月19日、アメリカ人乗

客が下船するのが2月17日である)。発症日の記載がない有症状者もあり、2月4～6日が31人(乗員1+乗客30)、7～14日が36人(乗員15+乗客21)、15～19日が36人(乗員8+乗客28)と付記されている。報告日は発症日の概ね3日後なので、拙稿においては、2月1～3日に10.3人ずつ、4～11日に4.5人ずつ、12～16日に7.2人ずつ追加した数値を用いることにする(図3)。なお先述の厚生労働省からの報道発表資料の数値はPCR検査の結果がわかった日であるため、グラフの数値とは異なっている。また無症状病原体保有者も報道発表資料には含まれている。

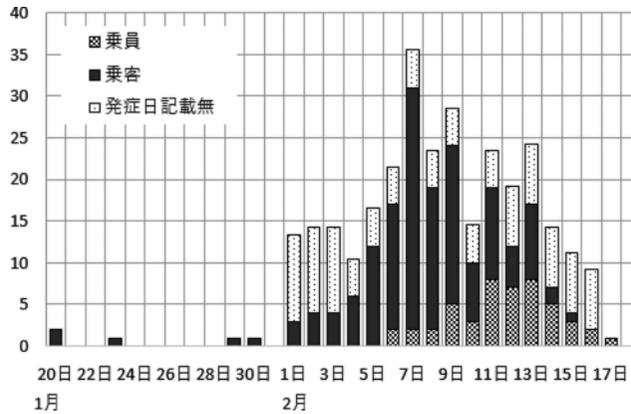


図3. 厚生労働省の資料をもとにした発症者数

厚生労働省の資料をよく見ると、2月5日に「船内個室管理開始」と記されているので、この日を境に2つのSIRモデルを考える。以下では、1月20日から2月5日を「伝播前期」2月5日から18日までを「伝播後期」と呼ぶことにする。

3-2. SIRモデルを用いた感染症拡大シミュレーション

伝播前期について考察するにあたり、3つの仮定をする。①船内の乗客の人数は3711人で一定とする。実際には横浜港を出港後、香港、ベトナム、台湾等を巡っており、クルーズ船からの人の出入りがあったはずだが、最初に感染していた2人を除いて感染者の出入りはなかったものと仮定し、乗客乗員の人数の変化は実質的になかったものとする。②初期条件は、感染していない人の数 $S_0 = 3709$ 、感染者数 $I_0 = 2$ 、発症者数 $R_0 = 0$ とする。厚生労働省のデータでは1月20日の発症者数が2となっているが、自力で下船しており、それまで船内で隔離されていなかったようであり、実際に陽性が確認されたのはそれ以降なので、ここでは感染者数として扱う(そうしないと計算ができない)。③潜伏期間は1～14日程度(多くは5～6日)と見積もられている。これよりパラメータ λ を $1/14 = 0.07$ くらいに見積もり、 μ はデータを再現するように決定する。なお、第2章では $N = 1$ に標準化して計算を行ったが、この節では、 $N = 3711$ で計算する。厚生労働省によるデータが人数で与えられているため、直観的に比較がし易いというのが理由の1つで、もう一つは μ と λ を固定した場合 N の値によって得られる曲線が異なる

るためである。

以上の方針で、データを再現するようにパラメータセットを2つ求めた。1つ目は $\mu = 0.000108$, $\lambda = 0.069$ で、 λ が0.07に近くなるように選んだ(パラメータA)。もう1つは $\mu = 0.000109$, $\lambda = 0.056$ で、こちらは試行錯誤の末にデータをより再現するように求めた(パラメータB)。これらのパラメータを用いて得られる2月5日の感染者数(I_5)と発症者数(R_5)を表4に記す。

表4. 伝播前期計算でのパラメータ

パラメータ	A	B
μ	0.000108	0.000109
λ	0.069	0.056
I_5	349	443
R_5	78	77

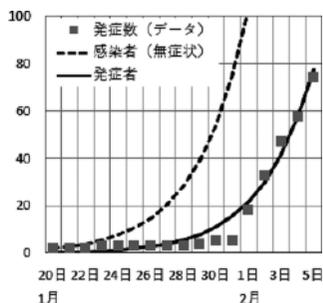


図5. 伝播前期 (パラメータA)

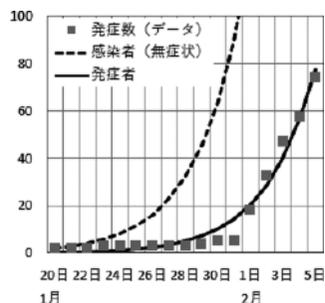


図6. 伝播前期 (パラメータB)

また(1.1)～(1.3)を数值的に解くと図5, 図6のようになる。図中の四角いマークがデータである。2つの図を見比べても違いはほとんどわからない。しかし数値上はパラメータBの方が、データとの差異が若干小さい。またパラメータBの方が2月5日時点での発症者数はパラメータAが78、Bが77で、データ値74より少し大きい。また感染者数はパラメータAが349、Bが443となっており、このモデルでは2月5日時点で既に350～450人が感染していたことが予想される。

λ について補足しておく。1/5 = 0.2位の大きな値を用いると1月30日前後の値がデータよりも大きくなる。厚生労働省のデータでは2月1日から発症者が急激に増加しており、これを再現しようとするとき λ がより小さくなる。元のデータに発症日未定の発症者があるため、1月末の発症者数がより多かったならば、潜伏期間5～6日に相当するより大きな λ を用いる必要があるだろう。

次に伝播後期について考察する。伝播後期においては、伝播前期と同様に2つの仮定をする。
 ① 船内の乗客乗員の数は3711人で一定とする。クルーズ船は隔離状態にあり、外部から人の流入はない。医療機関に搬送された人数は発症者(R)として扱われる。
 ② 乗客と乗員は区別しないで合計人数のみを用いる。この期間中乗客は客室で待機していたが、乗員はクルーズ船

や乗客へのサービス維持のため行動を制限されていなかったようである。したがって乗客と乗員の2つのグループに分けてモデルを作り直すべきであろう。乗員間の感染伝播、乗員と乗客間の伝播、客室内での伝播に大別し、客室内での伝播は個々の客室に細分化するべきである。しかし拙稿では、大規模な計算に挑むことはせず、乗員と乗客を区別しないという仮定のもと、 μ を伝播前期とは異なる値に設定することによって、厚生労働省のデータをどの程度再現できるかを試みる。そうすることによってモデルの限界が見えてくるかもしれない。

次に伝播後期の計算で用いる2つのパラメータについて述べる。 μ は上述したとおり、データを再現するように選ぶ。 λ は感染者が発症し隔離されるまでの検査・隔離体制に関連したパラメータであり、数週間程度では大きく変化しないと仮定し、伝播前期と同じ値を用いる。

表 7. 伝播後期でのパラメータ

パラメータ	A	B
μ	0.000015	0.0000096
λ	0.069	0.056
I_5	349	443
R_5	78	77
I_{18}	265	315
R_{18}	352	351

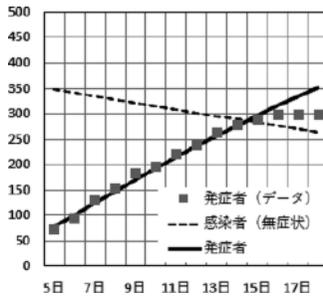


図 8. 伝播後期 (パラメータ A)

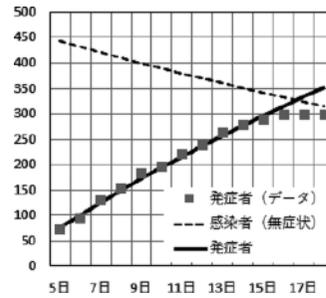


図 9. 伝播後期 (パラメータ B)

伝播前期の計算で求めた I_5 と R_5 を初期条件として、データを再現するようにパラメータを選ぶと表 7 のようになる。また計算結果を図 8 と図 9 に示す。データとの一致の度合いは、パラメータ A を用いた場合も B を用いた場合も大差はない。表 7 には 2 月 18 日の感染者数 (I_{18}) と発症者数 (R_{18}) も記されている。これら 2 つの値を合わせるとパラメータ A では 617 になり、初期条件が 427 だったので 190 増加している。またパラメータ B では 5 日に 520 だったが 18 日には 666 になり 146 増加している。パラメータの取り方によって多少の差異はあるが、5 日から 18 日までの間に感染した人数が 150 から 200 程度増加したことが見込まれる。18 日の累積発症者数のデータ値は 300 で、計算値はそれよりも大きい。18 日の時点ではまだ発症していなかった人が多くいたことが考えられる。その一方でクルーズ船の感染者数は最終的に 700 を超えるので、どちらのパラメータを用いても 18 日の計算値が小さい。17 日にはアメリカ人

乗客が出国しており、その他の乗客が19日に下船を始めるので、船内が混乱していてデータが不正確な可能性もある。あるいはその後に感染した人がいたのかもしれない。

ここで、パラメータ μ の意味について考える。 $N = 3711$ だったので、感染者1人が1日に感染させる人の数は 3711μ である。これを計算してみると、パラメータ A では伝播前期は0.401だったのが後期には0.056になる。同様にパラメータ B では0.404が0.036になる。つまりどちらのパラメータでも、クルーズ船が寄港後に医療スタッフが入船し、医療体制が整備されたことにより船内環境が変化し、感染率が約1/10に減少したことが推測できる。

最後に伝播前期と後期を合わせたグラフを図10（パラメータ A）と図11（パラメータ B）に示す。図中「外挿」と記されている曲線は、前期のパラメータを用いて18日まで計算を延長した結果である。どちらのグラフも傾向はとても似ている。伝播前期のパラメータを用いて18日まで計算をすると感染者は増加し16日頃にピークを迎える。もしもクルーズ船が18日まで感染防止のための措置をとらずに航海を続けていたならば、パラメータ A の場合、18日には感染者と発症者を合わせた人数は約3200になり、船内の乗客乗員の86%が感染したことになる。同様にパラメータ B の場合は3360で90%感染となる。2月5日以降クルーズ船内の医療体制は大きく変化したといえるだろう。

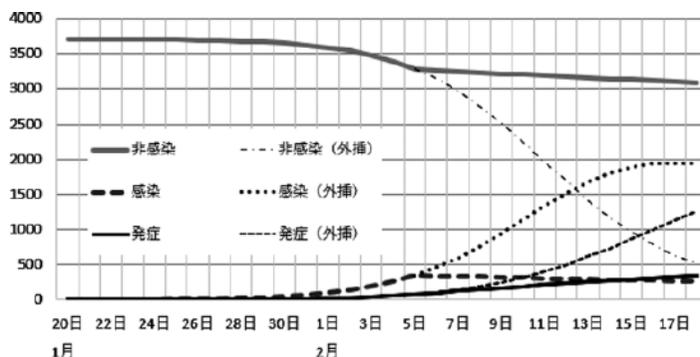


図 10. 感染者数の推移（パラメータ A）

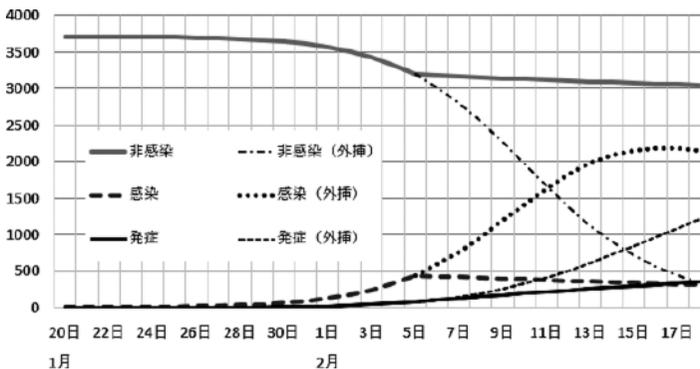


図 11. 感染者数の推移（パラメータ B）

以上をまとめると、SIR モデルを用いるとクルーズ船内での感染の様子をある程度推定することができるが、用いたデータが物理や化学で得られるような精密なものではないため、得られたパラメータによるデータ再現性の評価は不確かと言える。(1.1) ~ (1.3) を解くために必要なパラメータは2つあって λ は潜伏期間や検査体制との関係から制限が加えられるが、 μ にはそのような制限が全くないため、 μ を上手く調整すれば与えられたデータを程よく再現することは可能である。したがって拙稿で用いた2つのパラメータ A・B に優劣をつけることはできない。しかしこれらより得られた結果の傾向はとも似ており、2月5日を境に船内での感染伝播の様子が大きく変わったことは結論づけることができる。

4. より一般的な感染拡大シミュレーション

前章では微分方程式を解いてクルーズ船内で感染症が伝播する様子を考察した。この章ではクルーズ船での出来事に限定せず、一種のモンテカルロ法を用いて、より一般的な環境で感染が伝播する様子を考察する。

4-1. シミュレーションをする上でのモデル設定

人々は3人家族とし、昼間は外出し、夜は家庭で過ごすものとし、手洗い等の効果をオン・オフすることにより、各効果が感染拡大をどの程度抑制するかを調べる。なお、前節では感受性者、感染者、隔離された人の3つにカテゴリーを分けたが、この節では以下の4つに分ける。

- ① 感受性状態 (S) : 病気に感染していない、健康な状態。
- ② 飛沫付着状態 (E) : 感染した人からの飛沫が付着した状態。まだ感染しておらず、他の人に病気を伝染することはない。洗って飛沫を落とすことができる。
- ③ 感染状態 (I) : 潜伏期間内で、病気にかかったという自覚がない状態。他の人に飛沫が付くと病気を伝染することがあるが、直接病気を伝染しない。
- ④ 発症状態 (R) : 潜伏期間が過ぎて発症し、物理的に隔離された状態。他の人に飛沫を飛ばしたり、直接病気を伝染することはない。

計算に必要なパラメータとして、集団の全人数を N 、最初に感染していた人の数を n_0 とする。そして、以下の1日をサイクルとして感染が拡大していくと仮定する。

(1) 朝

- ① 感染状態の人は感染日数 ($d_{senpuku}$) を1減らす。
- ② 感染日数が発症日数に達した感染者は発症状態に移る。
- ③ 飛沫付着状態の人は確率 P_2 で感染する。感染してから発症するまでの日数 ($d_{senpuku}$) は、乱数で決める (最大 d_{max})。

以上を流れ図で表わすと図13のようになる。

(2) 昼

感受性状態、飛沫付着状態、感染状態の人は外出する。そして感受性状態の人と飛沫付着状態の人は確率 P_1 で飛沫が付着する (既に飛沫が付着している人に更に付着しても、同じ状態が続くだけ)。飛沫付着の機会は乱数で決め、その最大回数は感染者数 $\times P_3$ とする (P_3 は感

染者に接する確率)。流れ図で表わすと図 14 のようになる。

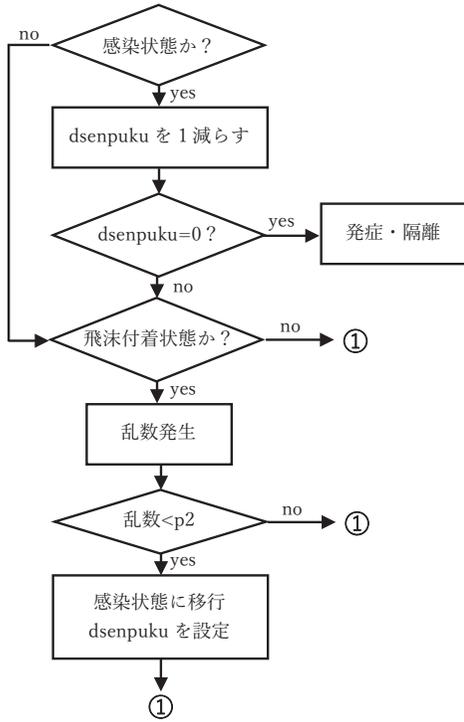


図 13

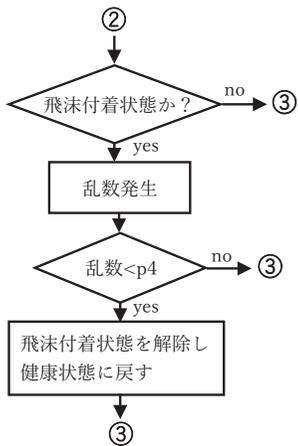


図 15

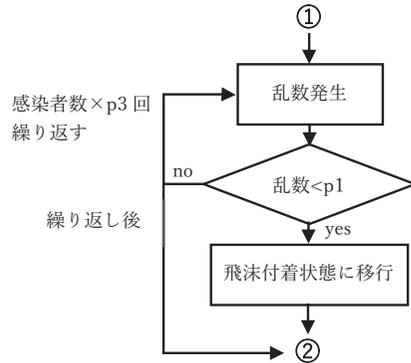


図 14

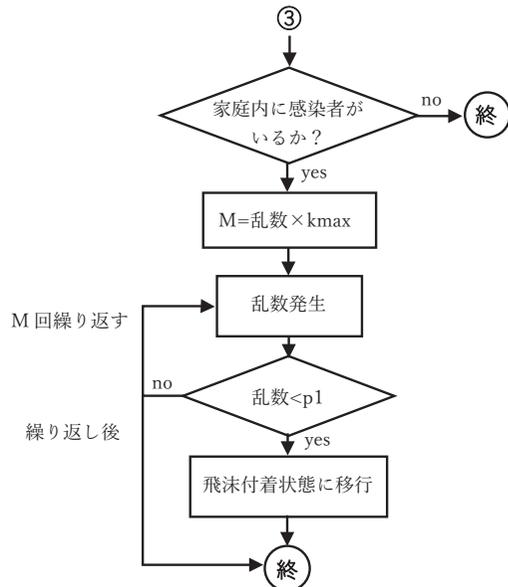


図 16

(3) 夜

- ① 人々は帰宅し、手を洗う。手洗いによって飛沫が除去される確率を P_4 とする。流れ図で表わすと図 15 のようになる。
- ② 家族の中に感染者がいる場合、それ以外の人に確率 P_1 で飛沫が付着する。飛沫付着の機会は乱数で決める（最大 k_{max} 回）。流れ図で表わすと図 16 のようになる。

4-2. シミュレーション結果

最初に朝と昼のプロセスだけでシミュレーションをした場合を示す。この場合は、前節の SIR モデルにおいて微分方程式を解いたのをシミュレーションに変えただけで、追加のプロセスを加えていない。したがって、図 1 と同様の結果が得られるはずである。 $N = 3711$, $n_0 = 10$, $P_1 = 0.07$, $P_2 = 0.2$, $P_3 = 0.1$, $d_{max} = 10$ （パラメータセット C）を用いた場合の結果を図 17 に示す。なお以下のシミュレーションは乱数を発生させて行うため、SIR モデルでの計算とは異なり毎回結果が微妙に異なる。そこで 10 回程度行って平均をとり、図を作成した。乱数の発生の方によっては感染が拡大せずに収束する場合もあり、その場合については除外した。

パラメータセット C を用いたシミュレーションでは、感染が止まるまでに約 69 日かかる。また 3711 人ほぼ全員（3697 人）が感染発症する。全体の傾向は図 1 と同様である。2 日目から 3 日目に変わるときに発症者数は約 1 人増えるが、3 日目の感染者数は約 16 人になる。同様に、10 日目から 11 日目に変わるときに発症者数は約 14 人増えるが 11 日目の感染者数は約 126 人である。つまり感染が拡大している時期には、実際の感染者数は新たに発見された発症者数よりもっと多い。

次にパラメータセット C で人数を $N = 999$ に変えた場合を図 18 に示す。感染が止まるまでに 128 日かかり、999 人中平均 611 人が発症する。図 17 に比べ感染者数が緩やかに増加する。また発症者数も少なめである。人数が多い方が指数関数的にいききに感染が拡大することがわかる。

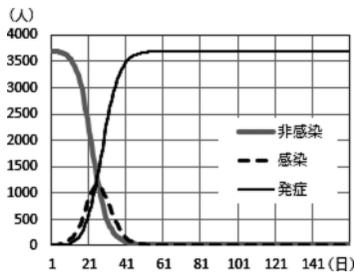
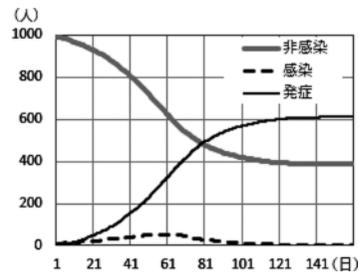


図 17. パラメータセット C

図 18. $N = 999$

パラメータセット C で潜伏期間を 5 日 ($d_{max} = 5$) に変えた場合を図 19 に示す。感染が止まるまで 85 日かかり、平均 3335 人が感染発症する。潜伏期間が減ると感染者数が減って感染率が減り、感染拡大が緩やかになる。パラメータ C に比べて発症者数もやや少ない。

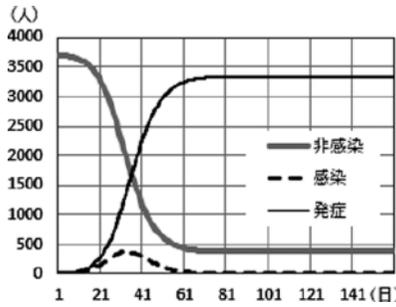


図 19. $d_{max} = 5$

パラメータセット C では朝と昼のプロセスだけだったが、更に夜のプロセスを加えた場合を以下に示す。最初に手洗い等により付着物が除去される効果を加える ($P_4 = 0.4$)。それから、手洗いの後に再度家庭内で飛沫が付着する効果を加える。繰り返し回数は最大 $k_{max} = 10$ (パラメータセット D)。他の値はパラメータセット C と同じである。

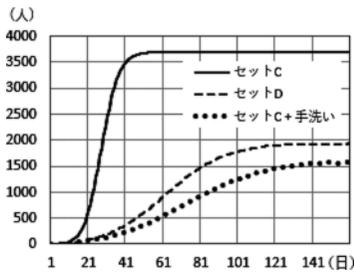


図 20. 発症者数の推移

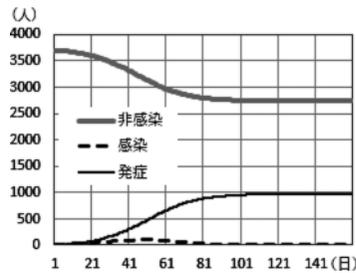


図 21. 家族に発症者がいた場合、昼に外出しない

発症者数の推移をパラメータセット C + 手洗い、パラメータセット D とで比較した図が図 20 である。手洗いの効果は飛沫が付着した人の内 40% が除去されるように設定しているが、それでも感染発症者数は半分以下に減少する。逆に感染率が低下するため、感染が止まるまでに時間がかかる。更に家庭内で飛沫が飛ぶ効果を加味すると感染率が上がり、発症者数が増加する。パラメータセット C + 手洗いの場合、止まるまでの時間は 156 日で発症者数は 1605 人。パラメータセット D では感染が止まるまで 139 日で、発症者数は 1932 人である。

ここまでは、発症状態以外の人は昼間に外部で活動をするという設定であったが、最後に、家庭内に発症者がいた場合その家庭内すべての人が昼間に外出しないという設定に変更する。朝と昼に加え、夜のプロセスを内包しているパラメータセット D を用いてシミュレーションした結果を図 21 に示す。感染が止まるまでに 107 日かかり、発症者数は平均 964 人であった。発症者数はこれまでで最も少ない。身近な人に感染発症者がいた場合、外出をしないということが、感染拡大抑止に大きな効果があることが推測できる。

5. まとめ

拙稿前半では、SIR モデルを用いて、COVID-19 がクルーズ船ダイヤモンド・プリンセス内で感染拡大していく様子を考察した。また後半では、モンテカルロ法を用いて感染が拡大していく様子を考察し、付着した飛沫を除去したり、外出自粛をすることの効果を検証した。しかし実社会においては、様々な要因がからみあって感染が拡大していくため、人口を年齢や性別等によって分けた、より複雑かつ大規模な計算が必要となる^[2]。

参考文献

- [1] W.O. Kermack and A.G. McKendrick (1927) “A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics - I,”
Proceedings of Royal Society, series A, vol.115, pp.700-721.
- [2] 小林鉄郎, 西浦博, 数学セミナー 2020年9月号, p14.
- [3] H. Inaba (2016) “Endemic threshold analysis for the Kermack-McKendrick reinfection model” Josai
Mathematical Monographs vol.9, pp.105-133.
- [4] 厚生労働省ホームページより (<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000599265.pdf>)
- [5] 国立感染症研究所ホームページより (<https://www.niid.go.jp/niid/ja/diseases/ka/corona-virus/2019-ncov/2484-idsc/9410-covid-dp-01.html>)

