

新型コロナウイルスの収束

Takesi Saito (齋藤 武)

Department of Physics and Astronomy, School of Science
Kwansei Gakuin University

(2024. 12. 12 京都府立医大での講演)

- 2019. 12. 中国武漢に端を発した新型コロナウイルス感染症の蔓延は、幾つかの感染の波を経て、2024. 10. その第11波が収束に向かっていました。発生当初は肺機能が侵されて死に至る病と恐れられ、自粛生活とワクチンを要請されましたが、次第に重症化率は低くなり、第6, 7, 8 波になると普通の風邪並みになってしまい、自粛も規制も解除されました。当初は感染症法上 2 類相当の扱いで始まったのが、2023. 5. 8にはインフルエンザと同じ 5 類の扱いになり、マスクも個人の自由になりました。
- この講演では、新型コロナが収束した原因を、免疫学のSIR方程式を用いて数学的に探るのが目的です。

下は日本における新型コロナ感染の第5～8波の期間とウイルス変異株をまとめたものである：

第5波、2021.7.1—9.30 デルタ株、 $\alpha = 2.5$ 基本再生産数
第6波、2022.1.1—3.31 オミクロンBA1.2, $\alpha = 5$
第7波、2022.7.1—9.30 オミクロンBA.5, $\alpha = 10$
第8波、2022.10—2023.2. オミクロンBA.5(7割)、BQ.1、
BA.2.75(3割)。データが出なくなったので α は計算できない。
2024.11～KP.3(7割), XEC(3割) 感染率高い、重症化はない、免疫回避する。

この論文は以下の二つを示すことが目的である[1]：

- ・ **A: 集団免疫閾値 $= 1 - 1/\alpha$ が $\alpha = 10$ で90%に達したため収束**
- ・ **B: 感染力が強くなればなるほど、致死率が小さくなる。つまりウイルスは弱毒化する。**

SIR方程式：Kermack-Mckendric, 1927提出される

$$S(t) + I(t) + R(t) = 1$$

$$dS/dt = -c\alpha SI$$

$$dR/dt = cI$$

$$dI/dt = c(\alpha S - 1)I$$

S: 未感染者数 susceptible

I: 感染者数 infective

R: 回復者数 + 死亡者数 (除去数) removed

α : 基本再生産数 (感染率)

c: 除去率 ($ct = t'$) 回復時間 $t' = [1]$

7	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
6	S	S	S	S	I	I	I	I	I	R
5	S	S	S	S	I	I	I	I	R	R
4	S	S	S	I	I	I	I	R	R	R
3	S	S	I	I	I	I	R	R	R	R
2	S	S	I	I	I	I	R	R	R	R
1	S	I	I	I	I	R	R	R	R	R
	0	1	2	3	4	5	6	7	8 (日)	

$S(t)$, $I(t)$, $R(t)$ の数の数え方についての注意

$R(8)=6$ = 累積で6人、この日に新しく回復した人は1人

$I(t)$ も $S(t)$ も同様累積数を表す。

例 $S(5)+I(5)+R(5)=1+3+3=7$ を $0.14+0.43+0.43=1$ のように表す。

$$N_0(\text{全人口}) - V(\text{ワクチン、自粛者数}) = N(\text{感染可能な人口})$$

感染しない人口 V は一般に時間とともに変動するが、任意性があるので、ここでは平均化し一定とする。この N を1に規格化する。

感染率が分かれば、 N はデータから計算で求めることができる。

(V が変動するワクチンを取り入れる理論も構成できるが、式が複雑になるだけで、本質に変わりはない)

$$dS/dt = -c\alpha SI$$

$$dR/dt = cI$$

の二式より

$dS/dR = -\alpha S$ を得る. $R(0)=0$ and $S(0)=1$ 初期条件から

$$S(t) = e^{-\alpha R(t)}$$

$$R(t) = -\log S(t) / \alpha$$

$$I(t) = 1 - S(t) + \log S(t) / \alpha$$

が得られる。

$$(1) \quad dS(t)/dt = -c\alpha S(t)I(t)$$

$$(2) \quad dR(t)/dt = cI(t)$$

$$(3) \quad dI(t)/dt = c[\alpha S(t) - 1]I(t)$$

初期 $t=0$ では、 $S(0)=1$, $I(0)=R(0)=0$ である。 c は除去率、 $\alpha S(t)$ は実行再生産数といわれる。SIR方程式は α と c を与えれば数値計算で解けてしまい、 $S(t), I(t), R(t)$ それぞれのカーブが描ける[下図参照]。

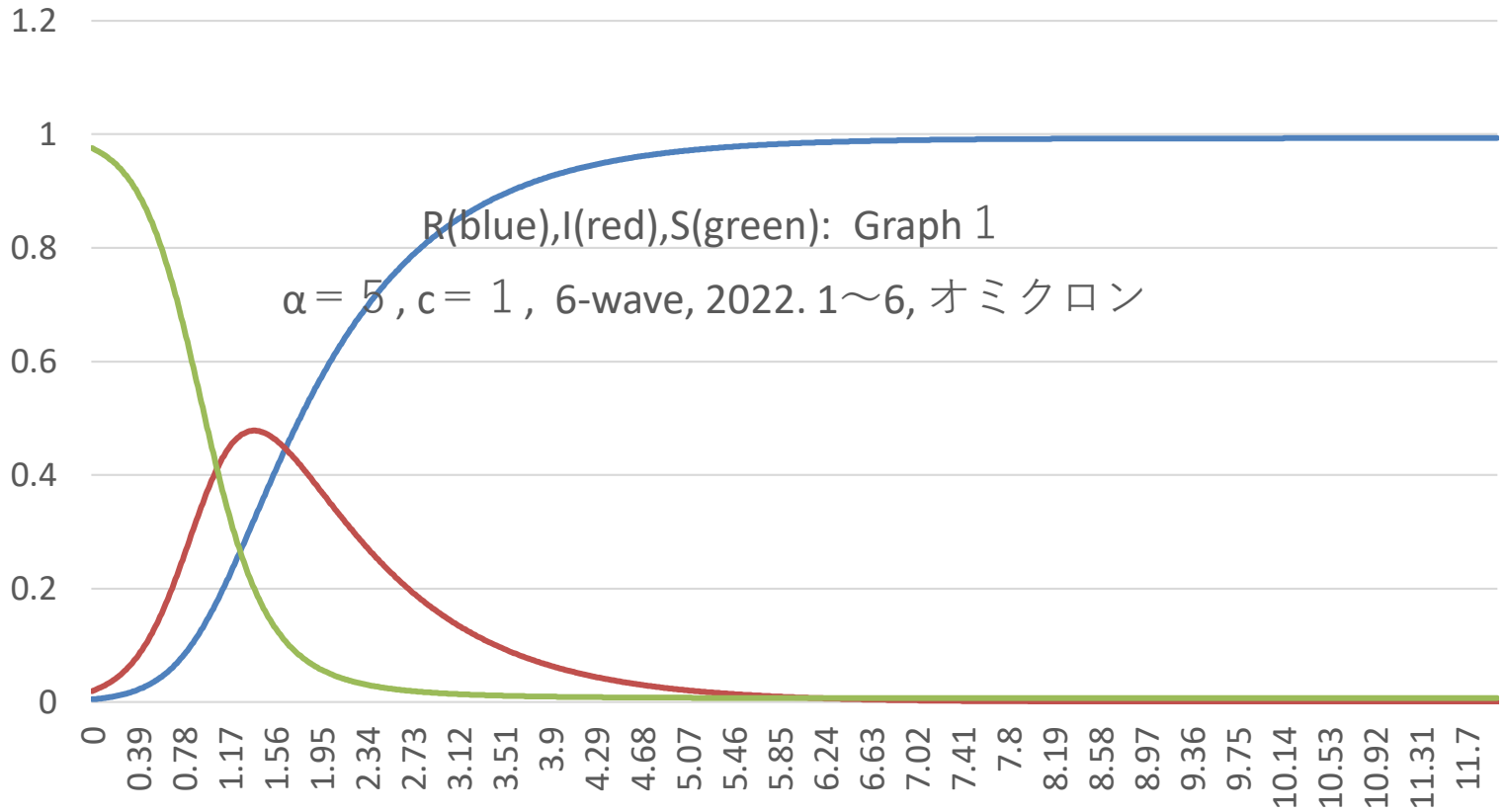
感染のピーク時 $t = T$ では、次の三つの式が成り立つ

$$(4) \quad S(T) = 1/\alpha$$

$$(5) \quad R(T) = \log\alpha/\alpha$$

$$(6) \quad I(T) = 1 - (1/\alpha) - \log\alpha/\alpha$$

$1 - (1/\alpha) = R(T) + I(T) = T$ までの感染経験総数 = 集団免疫閾値



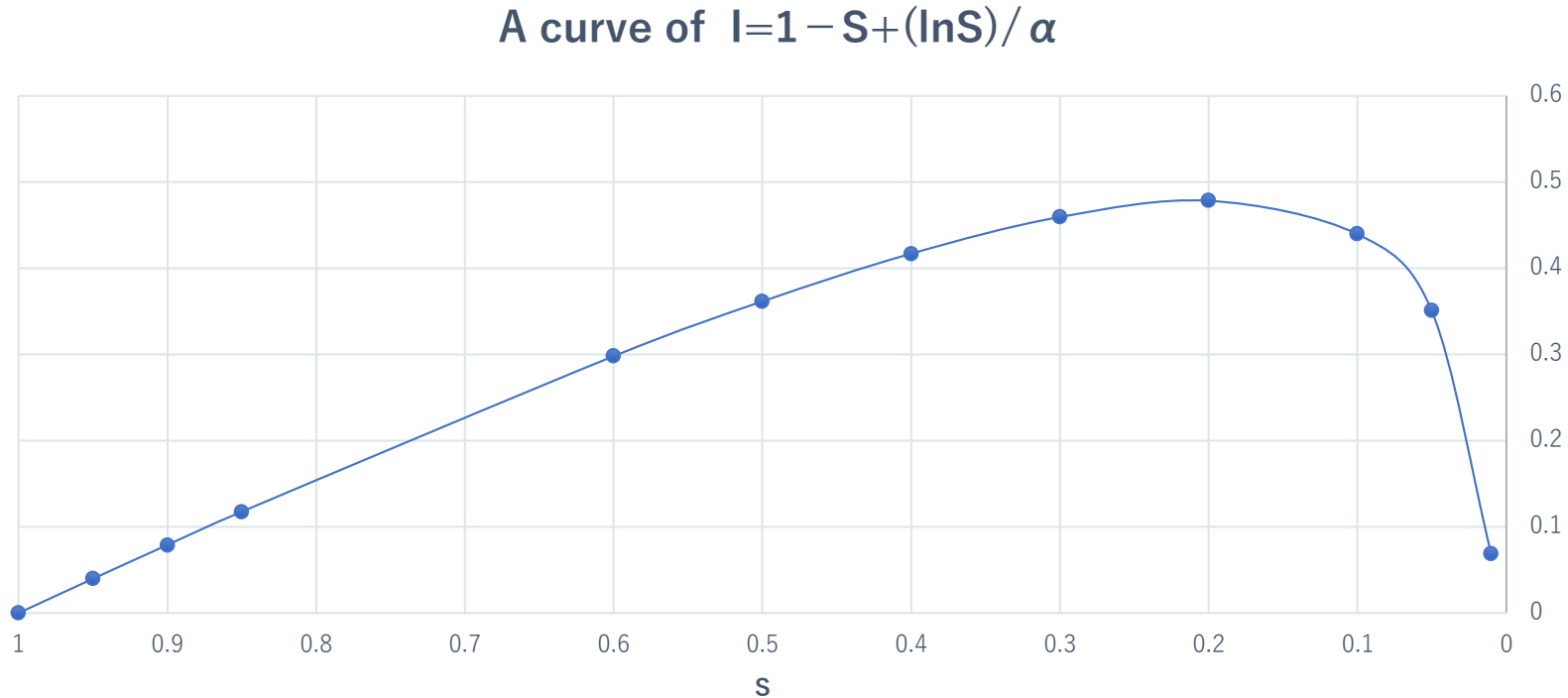


Fig. 0 . A curve of $I(t)$ against $S(t)$ for $\alpha = 5$ (第 6 波). The horizontal line is for $S(t)$, while the vertical line is for $I(t)$.

$S(T)=1/\alpha=0.2$ at the peak $[1, 0]=[1, 1/\alpha]+[1/\alpha, 0]$ に分ける。

$1 - 1/\alpha = R(T) + I(T) = \text{感染経験者総数(集団免疫閾値)}$

前半Aのまとめ

The herd immunity threshold(集団免疫閾値)

$HIT = 1 - 1/\alpha = R(T) + I(T) = \text{感染経験者総数}$

= 0.6 ($\alpha = 2.5$, 第5波)

0.8 ($\alpha = 5$, 第6波)

0.9 ($\alpha = 10$, 第7波)

0.93($\alpha = 15$, 第8波推定値)

新型コロナは第7波で $HIT=90\%$ を得たので収束した。
 $S(T)=1/\alpha$ は感染のピークでもある[1]。

後半Bの始まり： 致死率 λ の計算

疫学では、 $\lambda = D(t)/R(t) = \text{死亡者数} / \text{除去数} = \text{死亡者数} / (\text{死亡者数} + \text{回復者数})$ で定義される。ピークまでのデータ [2][3] から

NHK

$$\lambda (5\text{波}) = 1010/395024 = 0.0026, \quad 0.004 \quad \alpha = 2.5$$

$$\lambda (6\text{波}) = 1901/1295922 = 0.0015, \quad 0.003 \quad \alpha = 5$$

$$\lambda (7\text{波}) = 5484/5728243 = 0.00096, \quad 0.001 \quad \alpha = 10$$

第8波の致死率はRのデータが発表されなくなったので計算できない。致死率は α が大きくなるにつれ小さくなっている。

α が大きくなればなるほど、致死率 λ は小さくなる。したがってウイルスの毒素が弱くなる---定理

死亡者数は第4, 第5波、第6波になるにつれ多くなる。それは感染者数が多くなるため、致死率は次第に小さくなる。

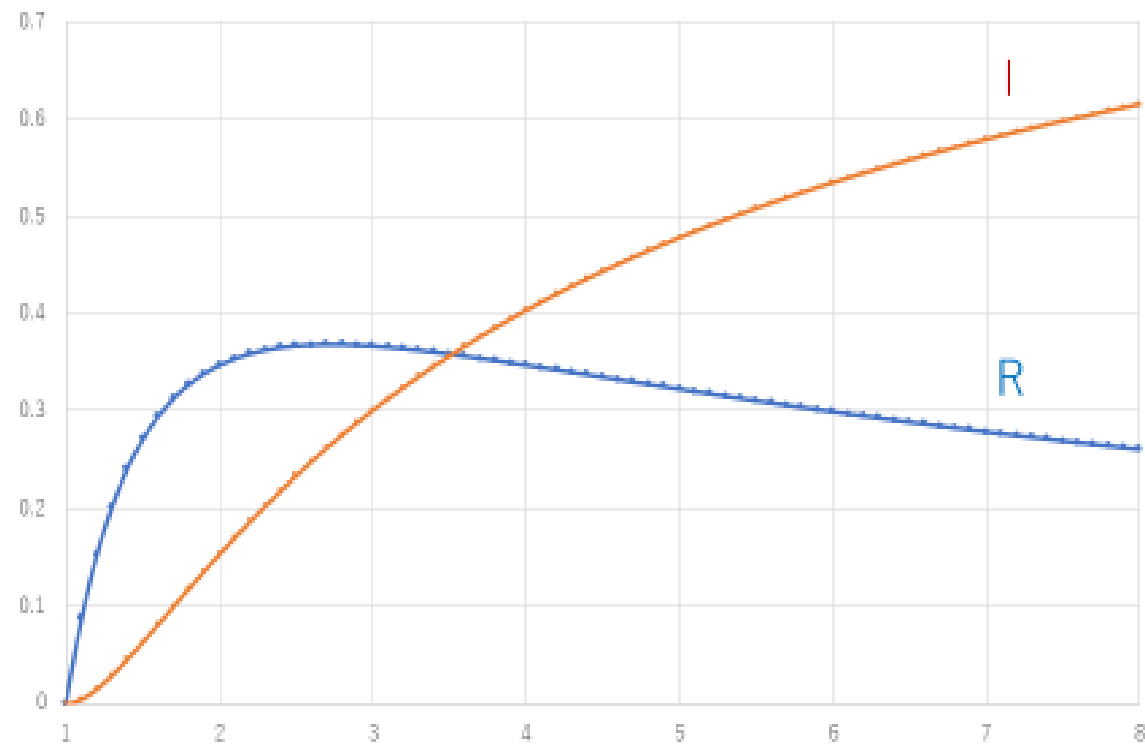
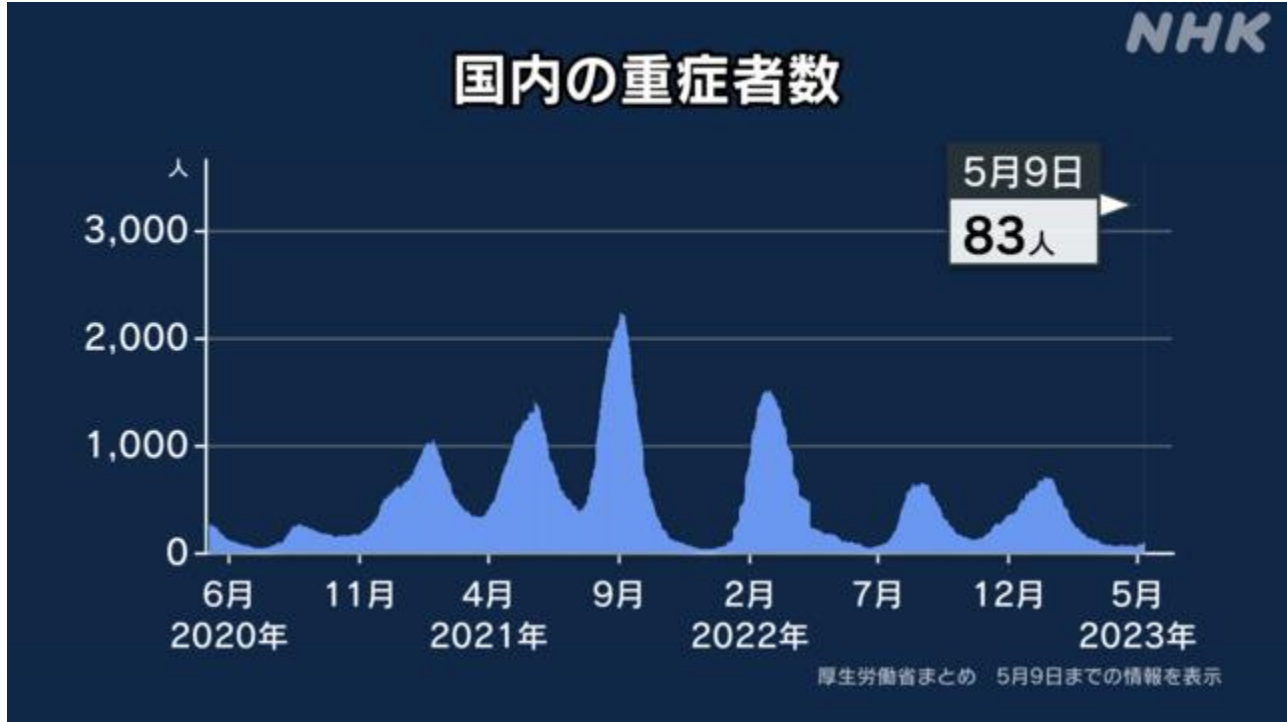


Fig. 1. 青色 $R(T) = (\log \alpha) / \alpha$ at $t=T$ (peak).
赤色 $I(T) = 1 - (1/\alpha) - (\log \alpha) / \alpha$ at $t=T$.
横軸 α for $\alpha \geq 1$. 交点は $\alpha = 3.5$.

赤ラインの上に1番目のポイントとして第5波のピークポイント、 $\alpha=2.5$, $I(T)=0.22$ を定める。2番目のポイントとして第6波のピークポイント、 $\alpha=5$, $I(T)=0.46$ を定める。これらのポイントを延長させると第7波のピークポイント、 $\alpha=10$, $I(T)=0.65$ を得る。これら3点は以下のNHK感染者数データによく合っている。

以下の図で、2021. 9月の山が第5波、2022. 2月の山が第6波、7月の山が第7波である[3]。







後半B のまとめ

新型コロナは中国武漢の市場にあった動物から人に感染したという説がある。鳥インフルエンザも渡り鳥(鴨) から鶏、飼育動物、人などに感染するといわれる。このように異種の生物の間でウイルスが移動するとき、当初は 重症化するが次第に軽症化に転じるようである。

その理由は、最初感染すると、人は経験したことがないウイルスなので、いろいろな免疫細胞がいろいろな免疫を発生させ免疫が暴走を始める(サイトカインstorm)。このため人は重症化する。相手が異種のウイルスのためこの感染力 α は弱いだらう。しかしだんだん波が進むと、人から人へと感染するようにウイルスが変異するので暴走がなくなり軽症化する。ウイルスは弱毒化したように見える。ますます感染しやすくなるので感染力 α も大きく変異する。結果として、感染力が強くなればなるほどウイルスは弱毒化する。

致死率 λ を求めると、 α が大きくなるにつれ λ は小さくなる：

$$\lambda (5波) = 0.0026, \quad 0.004, \quad \alpha = 2.5,$$

$$\lambda (6波) = 0.0015, \quad 0.003, \quad \alpha = 5,$$

$$\lambda (7波) = 0.00096, \quad 0.001, \quad \alpha = 10$$

つまりウイルスは弱毒化していく。したがって重症化数も減る。（図参照）

時刻 $t = \infty$ では、除去数(死亡数 + 回復数) は $R(\alpha = 10, t = \infty) = 1$ となるので、殆ど全員が回復し0.1%の死亡という結果になる。ここで1に規格化された人口とは、ワクチン者や自粛組を除いた感染可能な人口を指す。 α が分かれば推定できる人口である。

Appendix 1. クルーズ船

2020. 2. 3 クルーズ、ダイヤモンド・プリンセス号が横浜港に着いた。
 1. 20に横浜港を出港、1.25に香港で観光下船した80代の男性が2. 1、新型コロナウイルスに感染と判明。 2. 3、横浜港で停泊のまま乗船者全員の再検査が行われた。それから全員下船の3. 1までの感染データは次のとおりであった：

搭乗者 = 3711人、陽性者 = 712人、除去数 = 回復者658人 + 死亡者14人 = 672人、未感染者 = 2327人

搭乗者に対する割合で表すと、

$$1 = \text{未感染}S + \text{感染}I + \text{除去}R = 0.627 + 0.192 + 0.181$$

公式 $S = \exp(-aR)$ より感染率である基本再生産数 a を求めると、 $a = 2.58$

実行再生産者数は $aS = 1.62$ 、

集団免疫閾値は $1 - 1/a = 0.612$

このグループがその後も孤立している場合、感染はまだまだ続くことになる。

Appendix 2. 感染可能な人口N

1に規格化した人口とは「感染可能な人口」Nのことで、自粛している人々、免疫保持者などは除いている。Nは α がわかれば $R(t)$ のデータから次のように計算で求めることができる。

コロナ第5波(7/6~8/28ピーク)、第6波(1/5~2/13ピーク)の除去数Rのデータはピーク時Tまでで次のとおりである([17]東洋経済)。

$$N(5波)R(5波)=死者数+回復者数=1010+394014=395024人$$

$$N(6波)R(6波)=死者数+回復者数=1901+1294021=1295922人$$

$N(5)$, $N(6)$ はそれぞれの場合の「感染可能な人口」Nを表す。基本再生産数 α はそれぞれ 2.5 及び 5である。

公式 $R(T, \alpha) = \ln \alpha / \alpha$ より、 $R(T, 2.5) = 0.3665 = R(5)$ 、 $R(T, 5) = 0.322 = R(6)$ なので、

$$N(5)R(5) = 395024, N(6)R(6) = 1295922 \text{ に代入して、}$$

$$N(5) = 1077828 \sim 108(\text{万人}), N(6) = 4024602 \sim 402(\text{万人})$$

謝辞

岡村隆、小門陽、重本和泰の諸氏との有益な議論、また京都府立医大三水会における貴重なコメントに感謝いたします。

文献

[1] Takesi Saito, "Variants of SARS-COV-2 and the End of Infections I, II", arXiv: ResearchGate, [I]10/17, [II]12/5, 2024

[2] Data published from the Ministry of Health, Labor and Welfare of Japan.

[3] NHK感染症データと医療・健康情報より、新型コロナ日本国内の感染者数<全期間俯瞰>