

西神サイエンス研究会  
第18回研究会

# 新型コロナウイルス流行繰返し メカニズムの数理的考察

2022年3月30日

西元善郎、井上憲一  
(西神サイエンス研究会)

<https://science-research.p-kit.com/>

# 1. 本研究の動機

各国で新型コロナウイルスの流行が繰返され<sup>1)</sup>、暮らしや経済が疲弊している。しかし、「なぜ流行が繰返されるのか」、専門家から明快な説明がない。  
➡自粛の緩み、変異株？ メカニズムが不明では的確な対策が打てない

(日本)

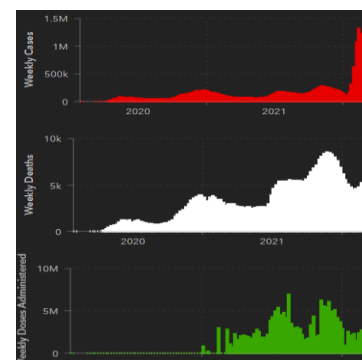
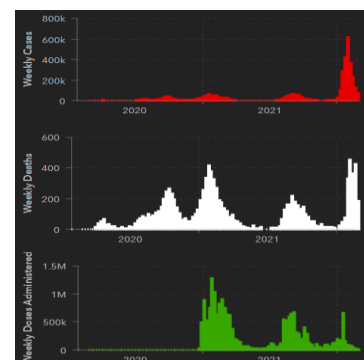
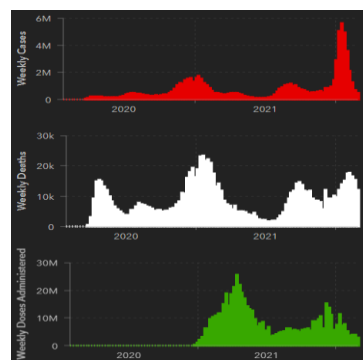
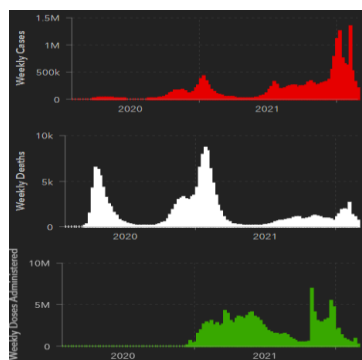
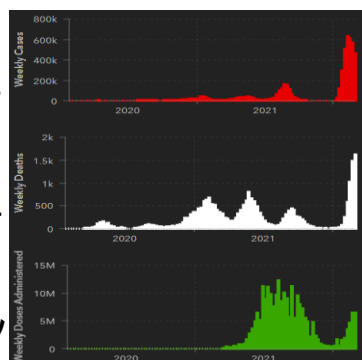
(英国)

(米国)

(イスラエル)

(ロシア)

感染者



死者

ワクチン

(中国)

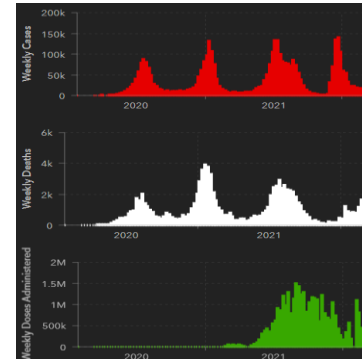
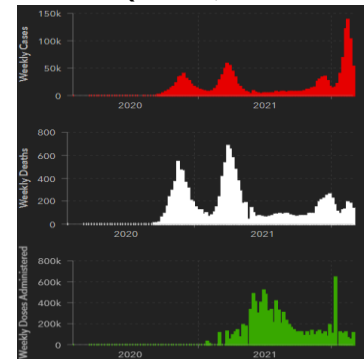
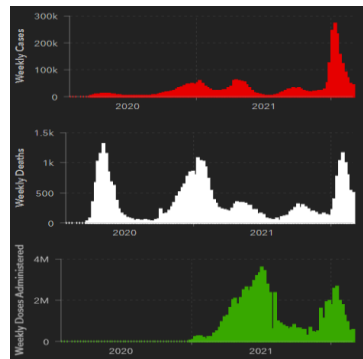
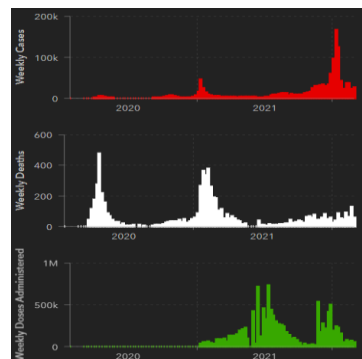
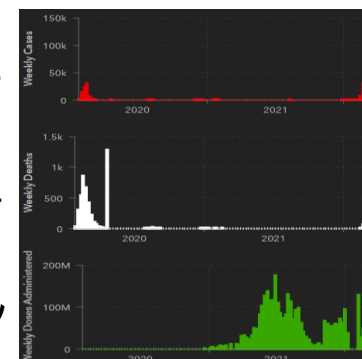
(アイルランド)

(カナダ)

(ヨルダン)

(南ア)

感染者



死者

ワクチン

1) <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> (22.3.11付)<sup>1</sup>

## 2-1. 古典理論・SIRモデル

スペイン風邪(新型インフル、1918-1919年、推定死者5,000万人)を契機に  
1927年、感染症の古典理論・SIRモデル<sup>2)</sup>が確立された。  
感染率 $\beta$ 、回復率 $\gamma$ のとき、感染者数 $I$ は近似的に

$$dI/dt = \underbrace{(\beta - \gamma)}_{\star} I = \beta (1 - 1/R_0) I \cdots (1)$$

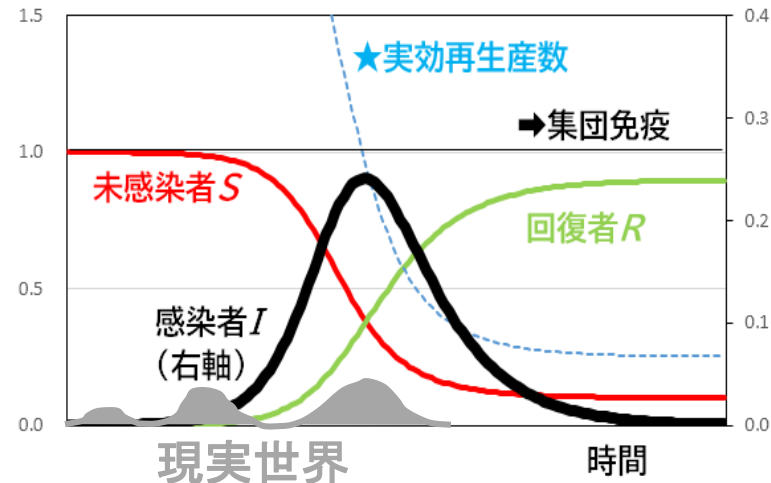
で表される。 $R_0 = \beta / \gamma \cdots (2)$ は基本再生産数、  
★は実効再生産数に相当し、 $>1$ で指数関数的増加、  
 $<1$ で減衰とカオス的。SIRモデルでは感染は集団  
免疫まで一気に進み、流行の繰返しは記述出来ない。

今日では、PCR検査で隔離する仕組みが普及しており、本研究では、全感染者を、  
 $I$ : 隔離されず、他者にうつす市中の潜在感染者  
 $Q$ : 隔離され、もはや他者にうつさない隔離感染者  
に分け、その比率を隔離率 $q$ とするSIQRモデル<sup>3)</sup>を出発点とした。

2) Kermack and McKendrick (1927), *Proc. Roy. Soc. of London. Series A* 115 (772): 700-721

3) T. Odagaki (2021), *Physica A*, 573, 125925

エントロピー→最大  
つまり、熱平衡



## 2-2. SIQRモデル

SIQRモデルで、感染率 $\beta$ 、回復率 $\gamma$ 、隔離率 $q$ としたとき、1日の全感染者数 $\beta I$ を隔離されない $(1-q)$ と隔離される $q$ に分けて考える。まず、隔離されず、感染源となる感染者 $I$ は次式で表される。

$$dI/dt = (1-q)\beta I - \gamma I \quad \dots(3)$$

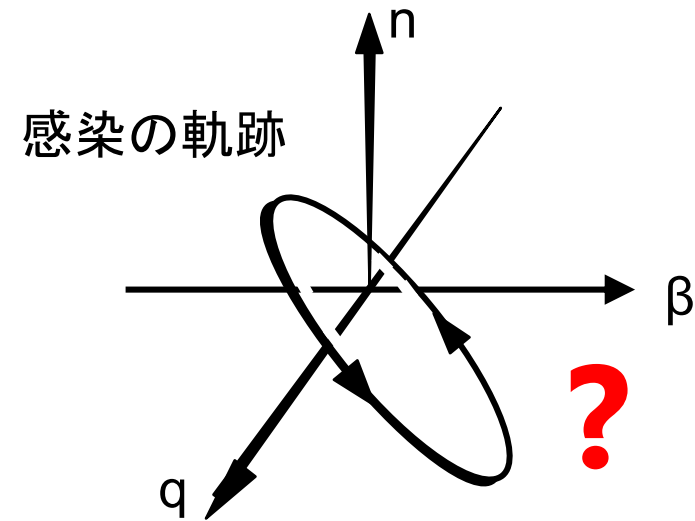
一方、日々の陽性者数 $n$ はPCR検査で陽性となり、隔離される感染者なので、次式で表される。

$$n = q\beta I \quad \text{即ち} \quad I = n/q\beta \quad \dots(4)$$

式(4)を式(3)に代入すると、次の感染方程式が得られる。

$$(1/n)dn/dt = (1/q)dq/dt + (1/\beta)d\beta/dt - \beta q + \beta - \gamma \quad \dots(5)$$

➡  $q$ - $\beta$ - $n$  位相空間において、周期解を探索する。



# 3-1. q-n位相平面でのシミュレーション

$$(1/n)dn/dt=(1/q)dq/dt+(1/\beta)d\beta/dt-\beta q+\beta-\gamma \quad \dots(5)\text{再掲}$$

ここで、 $\beta = \text{const.}$  つまり、同一ウイルスで感染率 $\beta$ が安定している場合、

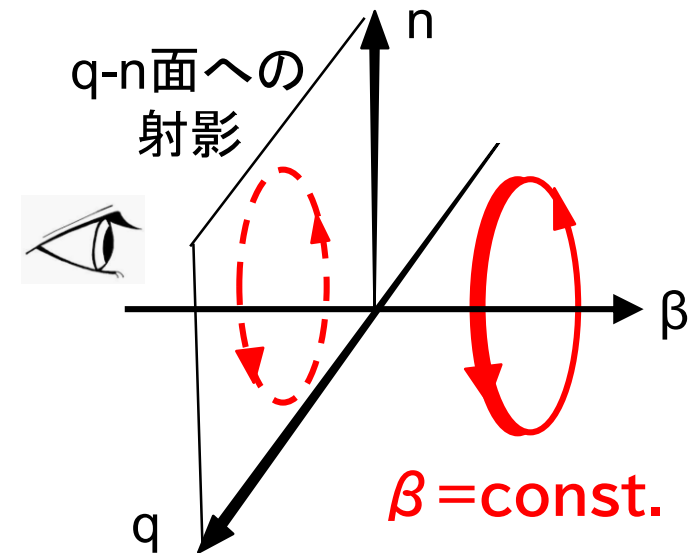
$$(1/n)dn/dt=(1/q)dq/dt-\beta q+\beta-\gamma \quad \dots(6)$$

式(6)の十分条件として、速度ベクトル場  
( $dq/dt, dn/dt$ )を、未定定数 $a, b, c$ を用いて

$$dn/dt=n(an+bq+c) \quad \dots(7)$$

$$dq/dt=q\{an+(b+\beta)q+c-(\beta-\gamma)\} \quad \dots(8)$$

で表すことが出来る。



## 3-2. q-n位相平面での周回挙動

式(7)(8)の速度ベクトル場は非線形性から、

\*  $dn/dt=0$ ,  $dq/dt=0$ をヌルクラインとし、

\*  $a \cdot b < 0$ の時に**活性-抑制系**を生成する

ことが知られている<sup>4)</sup>。

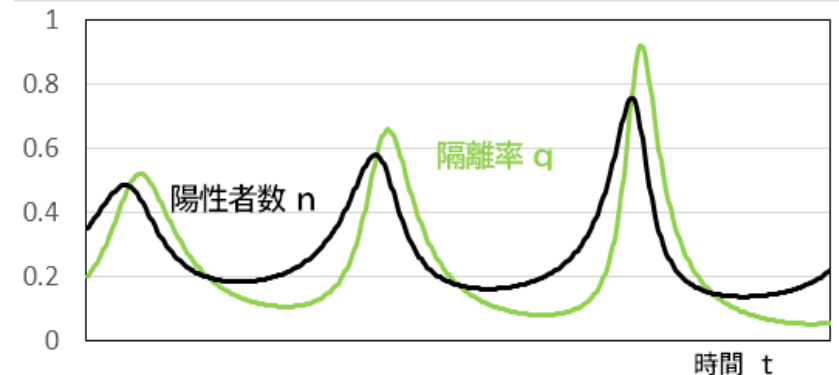
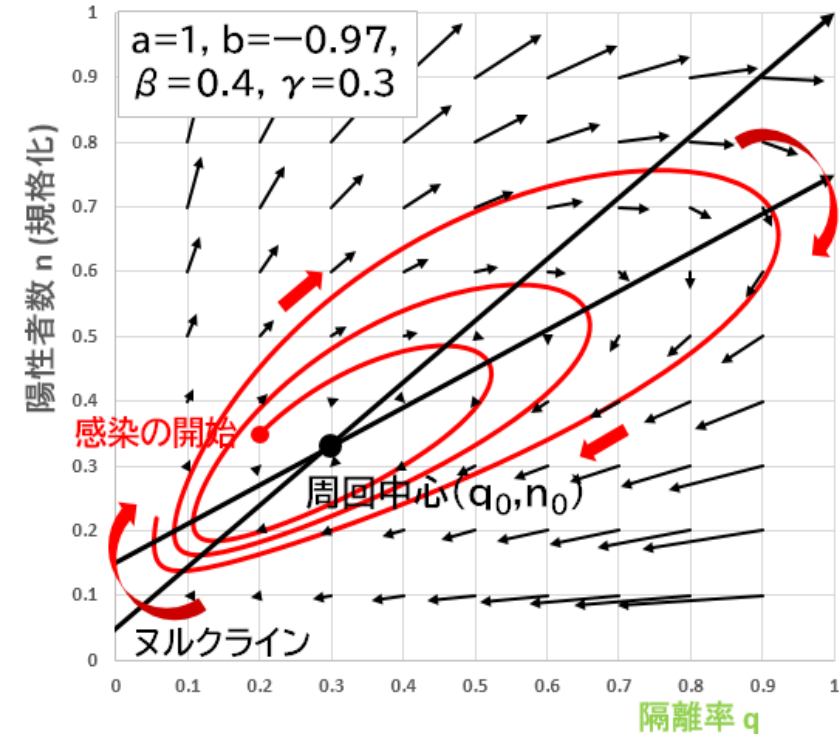
ヌルクラインの交点 $(q_0, n_0)$ が周回中心で、

$$q_0 = 1 - 1/R_0 \quad \dots (9)$$

となる。つまり、基本再生産数が大で感染力の強いウイルスほど、周回中心は右にずれていく。

今、 $a=1$ ,  $b=-0.97$ ,  $\beta=0.4$ ,  $\gamma=0.3$  でシミュレートすると時計回りのベクトル場が生じ、感染の開始が $q=0.2$ ,  $n=0.35$ の場合、**徐々に広がる感染の周回挙動**が確認出来た。

4) [Math235-Solutions-Spring2015 \(wordpress.com\)](http://Math235-Solutions-Spring2015.wordpress.com)



## 4-1. $\beta$ - $n$ 位相平面でのシミュレーション

$$(1/n)dn/dt=(1/q)dq/dt+(1/\beta)d\beta/dt-\beta q+\beta-\gamma \quad \dots(5)\text{再掲}$$

同様に、 $q=\text{const.}$  つまり、こまめなPCR検査で隔離率 $q$ が安定している場合、

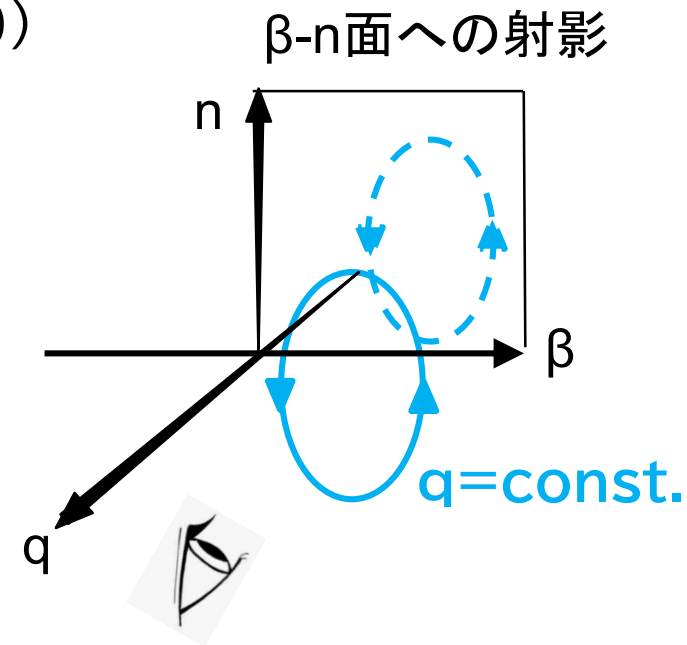
$$(1/n)dn/dt=(1/\beta)d\beta/dt+(1-q)\beta-\gamma \quad \dots(10)$$

式(10)の十分条件として、速度ベクトル場  
( $d\beta/dt, dn/dt$ )を、未定定数 $a, b, c$ を用いて

$$dn/dt=n(an+b\beta+c) \quad \dots(11)$$

$$d\beta/dt=\beta\{an+(b+q-1)\beta+c+\gamma\} \quad \dots(12)$$

で表すことが出来る。



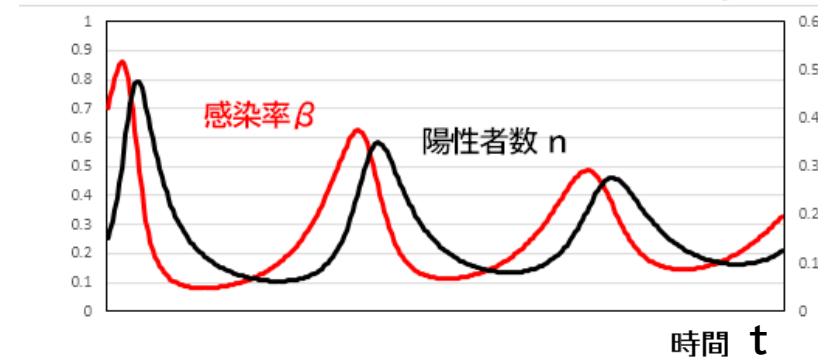
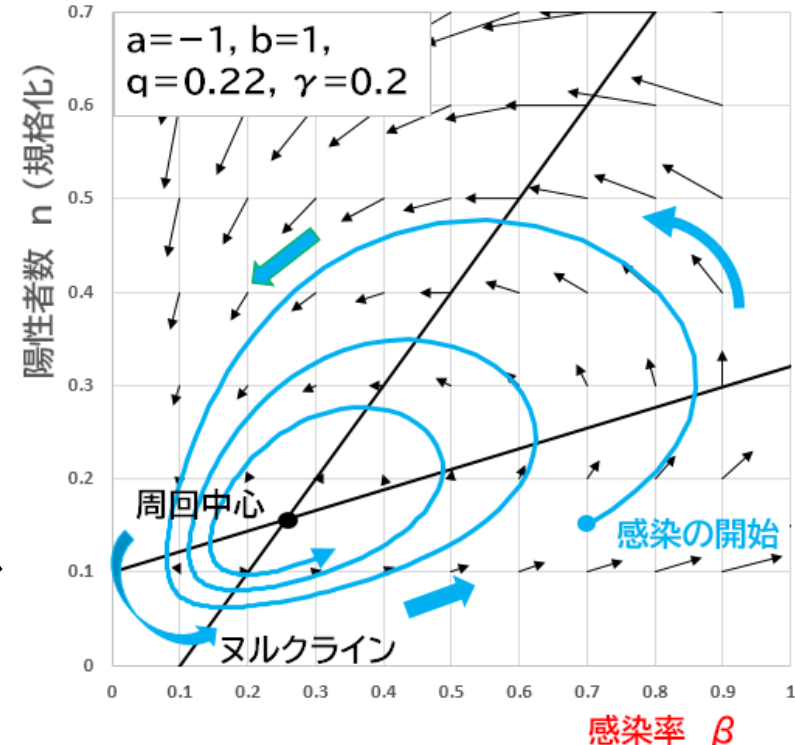
## 4-2. $\beta$ - $n$ 位相平面での周回挙動

式(11)(12)の速度ベクトル場は非線形性から、

\*  $dn/dt=0$ ,  $d\beta/dt=0$ をヌルクラインとし、

\*  $a \cdot b < 0$ の時に**活性-抑制系**を生成する

実際、 $a=-1$ ,  $b=1$ ,  $\beta=0.5$ ,  $\gamma=0.2$  でシミュレートすると反時計回りのベクトル場が生じ、感染の開始が $\beta=0.7$ ,  $n=0.15$ の場合、**徐々に収縮する感染の周回挙動**が確認出来た。



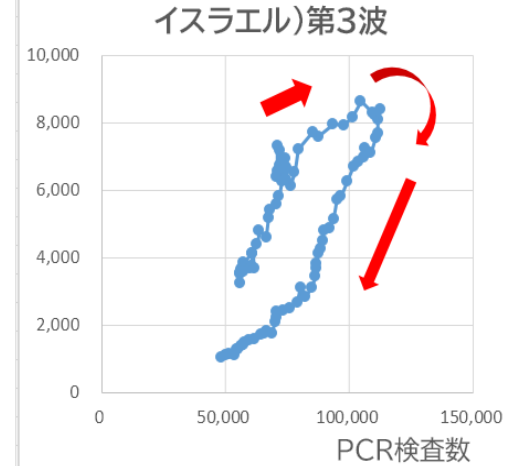
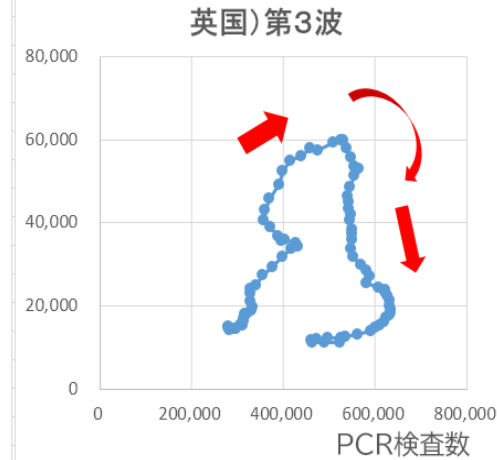
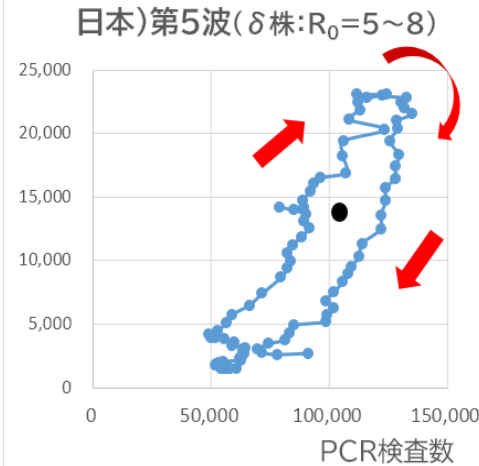
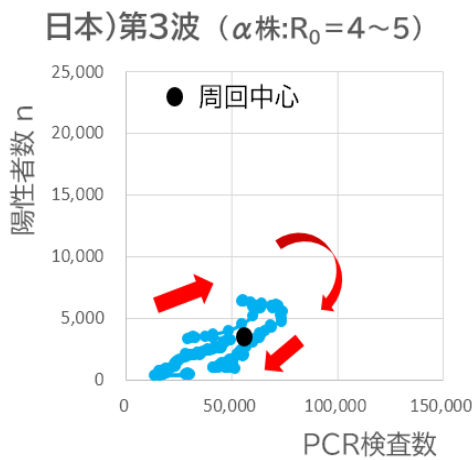
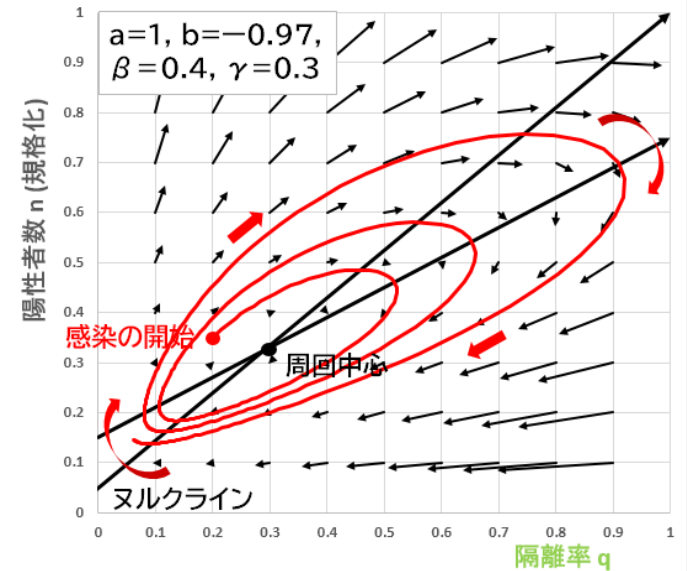
# 5-1. 実データと数理モデルの対比: 周回挙動

この数理モデルは**感染方程式の十分条件の解**

➡**現実がこの解を採用している保証はなく、  
実データで検証が必要**

しかし、実データでは感染率 $\beta$ 、隔離率 $q$ は未知

➡**隔離率 $q$ をPCR検査数で代用しプロットすると(\*)、  
数理モデルと類似の時計回り周回性が確認出来た**



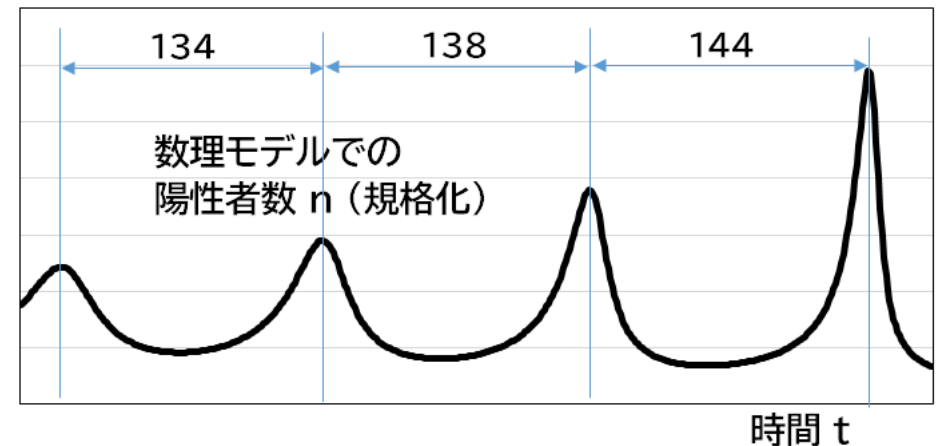
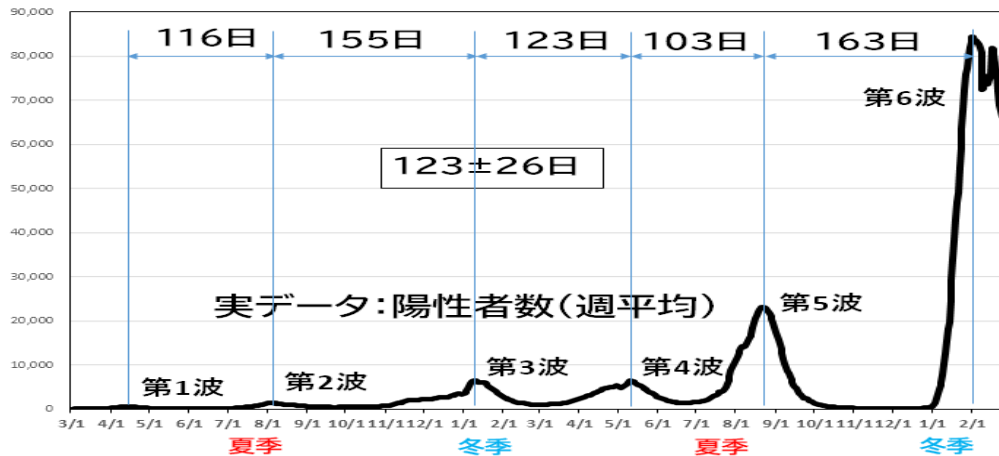
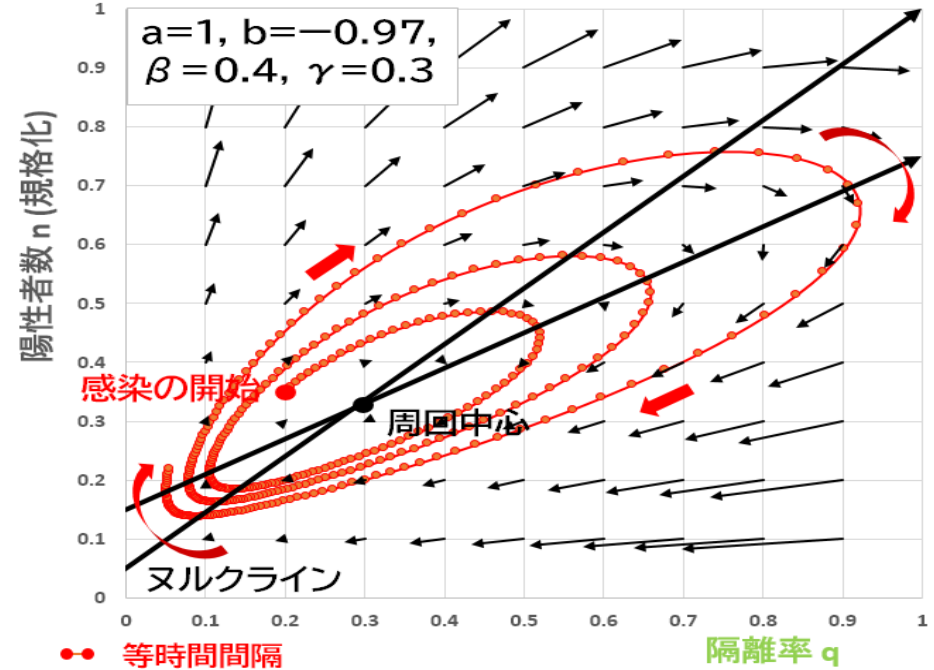
(\*)  $I \propto \text{陽性率} = n/\text{PCR}$ ,  $q \equiv n/\beta I \propto \text{PCR}$

# 5-2. 実データと数理モデルの対比: 周期

日本の第1波～6波のピーク間日数は  $123 \pm 26$  日で、**冬季**にやや長くなるが、概ね4か月前後の周期で繰り返す。(下図)

一方、 $q$ - $n$ 位相平面での周回挙動でも、たとえ軌道が倍以上に膨らんでも概ね等周期で周回している。(右上図)

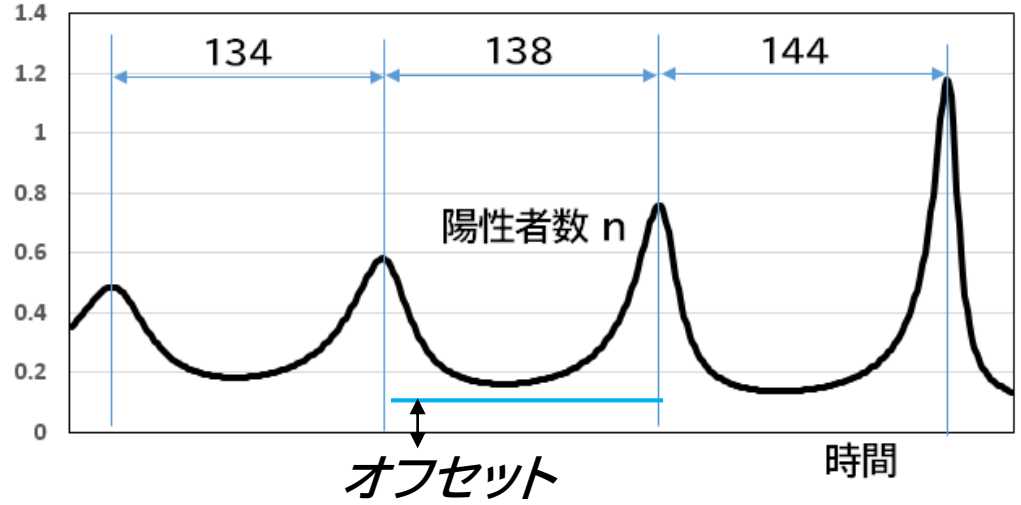
$$\text{周期 } T = \oint \frac{dL}{v} = \oint \frac{\sqrt{dn^2 + dq^2}}{\sqrt{(dn/dt)^2 + (dq/dt)^2}} \dots (13)$$



# 5-3. 実データと数理モデルの対比: 陽性者数の予想

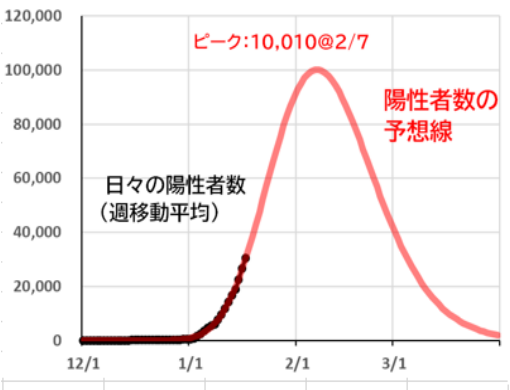
当数理モデルでは、陽性者数  $n$  は  
 $g(t) = \text{オフセット} + \text{対数正規分布}$   
 で近似される。

現在、蔓延中の第6波(オミクロン株)を  $g(t)$  でフィッティングすると、ピーク時期・規模等マクロトレンドがピークの半月以上前から予想できた。

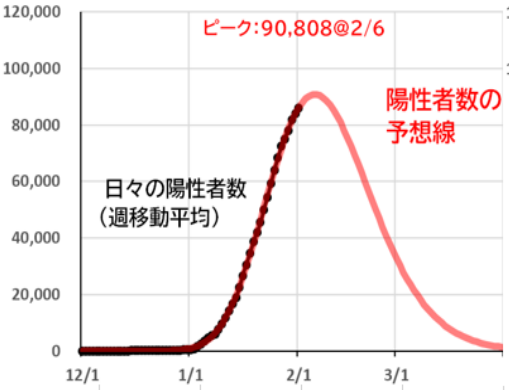


\* 見なし陽性等 → 市中感染?  
 \* ステルスオミクロン?

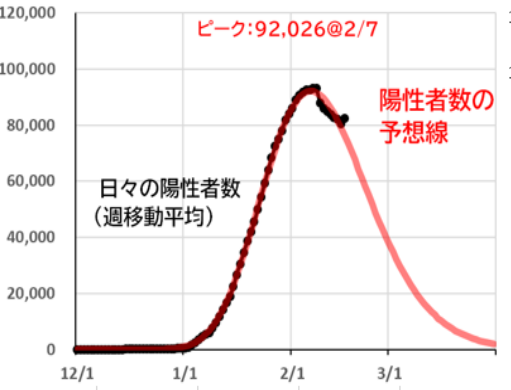
日本・第6波の予想 (1/17付け)



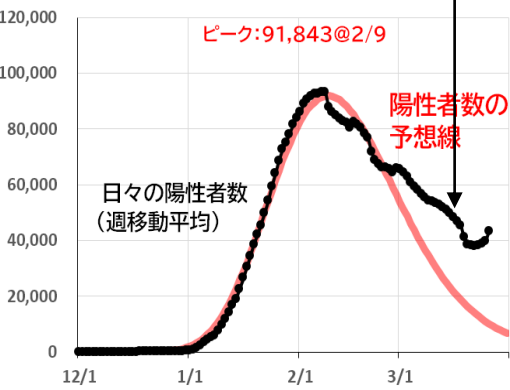
日本・第6波の予想 (2/1付け)



日本・第6波の予想 (2/16付け)

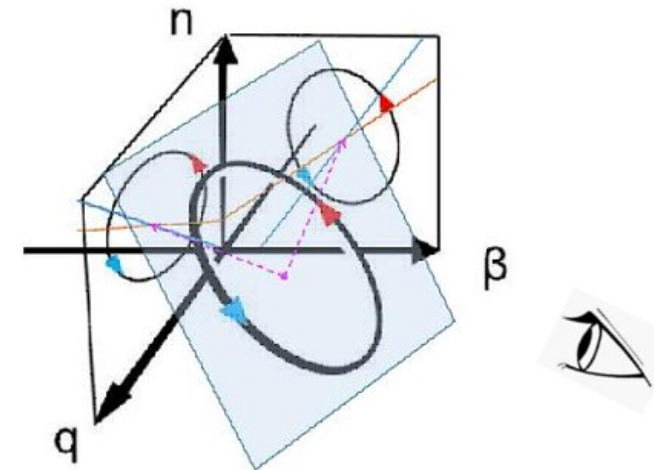
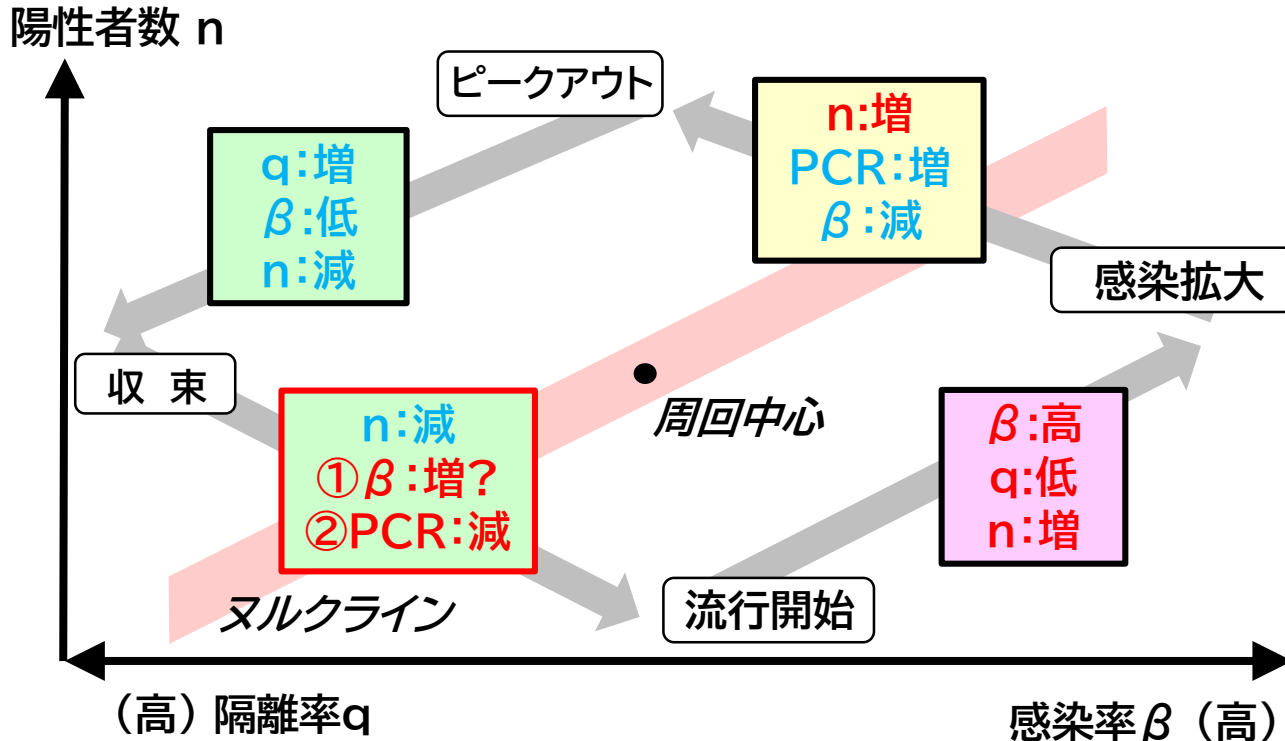


日本・第6波の予想 (3/1付け)



# 6. 感染繰返しを抑える方策(模索中)

- 次の波が開始されるかどうかは、
  - ➔ 原点近くでヌルクラインを越えて再び開始エリアに戻るかどうか
  - ➔ ①一層強力な感染率 $\beta$ の変異株到来？ or ②流行が峠を越えたと油断してPCR検査を減らし、隔離率 $q$ を下げる等に依存していると推察される。
- $\beta$ はウイルス次第だが、proactiveなPCR検査による $q$ 維持は実行可能



q- $\beta$ -n位相空間での理解

## 7. おわりに

(1) SIQRモデルに基づく感染方程式から、十分条件ながら、 $q$ - $\beta$ - $n$ 位相空間での活性-抑制系に対応した周期解を見出した。

➡ **集団免疫から遠く離れた非平衡の世界での自己組織化？**

cf. チューリング・パターン(シマウマ)、プリゴジンの自己組織(化学反応)

(2) 新型コロナの実データでも類似の周回挙動や周期性が見られることから、この数理モデルは感染繰返しの原因の掘下げに役立つと期待される。

(3) 今後、 $q$ - $\beta$ - $n$ 位相空間での挙動解析を深め、ウイルス側の変異戦略( $\beta$ )と、人間社会側の検査-隔離努力( $q$ )の統合的理解により、コロナ終息の一助となれば幸いである。

英論文(査読前): <https://connect.medrxiv.org/qr/2021.11.08.21266099>



ご静聴、有難うございました！

# (おまけ)日本ソーシャルデータサイエンス学会(JSDSS)

(1) 元々、川田さんから阪大・基礎工OBのシグマサロン研究会経由でご紹介戴いた中野教授(核物理研究センター長、感染症研究拠点CiDER)よりお薦めあり。

(2) 新参のマイナーな学会ながら、実業寄りのビッグデータやAIをテリトリーとし、データサイエンティスト育成のミッションで発展のポテンシャルはありそう。

(3) シンポ2022の雰囲気

東京理大学・石川学長: 真理追求型(analysis) vs. 価値追求型(synthesis, 社会が評価)  
問題(謎)を解く                      問題(課題)を作る

最優秀賞: 「エアライン向け乱気流可視化とAIの浸透」伊藤(元JALパイロット、桜美林大)

優秀賞: 「新型コロナ流行繰返しメカニズムの数理的考察」西元、井上(西神サイエンス研究会)

優秀賞: 「IoT情報を利用した自治体運用への適用」浦田、大場、水野(静岡理工科大)

優秀賞: 「自動車産業における拠点の地理的要因の実証研究」古川、大江(東京理科大)