2022年11月18日
第１０回いいぎりzoom談話会

感染症モデルでみる COVID-19

小田垣　孝
九州大学、科学教育総合研究所

今日の話

1. 感染症の歴史とSIRモデル
2. COVID-19の特徴
3. SIQRモデルによる分析
4. SPAQRモデルによる分析
5. ほかの話題

   感染状態の分類

   感染曲線の振動

   集団免疫について

   日本は何故収束しない

1.感染症の歴史とSIRモデル

古代から続く様々な感染症

感染症	原因	初見	
ペスト	ペスト菌	542～	黒死病（14世紀）
ハンセン病	らい菌	2400BC（エジプト）	
梅毒	梅毒トレポネーマ	？？（ハイチ？）	
はしか	麻疹ウイルス	~3000BC(中近東)	
天然痘	天然痘ウイルス	1350BC（エジプト）	1980 年根絶
コレラ	コレラ菌	1817(インド)	
発疹チフス	リケッチア		
腸チフスやパラチフス	チフス菌	16c(イタリア)	
結核	結核菌	7000BC	ミイラや人骨で確認
インフルエンザ	インフルエンザウイルス	412BC(ギリシャ)	1918スペイン風邪 5億人感染
ポリオ	ポリオウイルス	1840(ドイツ)	
マラリア	マラリア原虫	先史時代(アフリカ)	約3000万年前の古第三紀の琥珀中の蚊
ナイル熱・日本脳炎	日本脳炎ウイルス	323BC(メソポタミア)	
日本住血吸虫症	日本住血吸虫	1904(日本)	

新興感染症

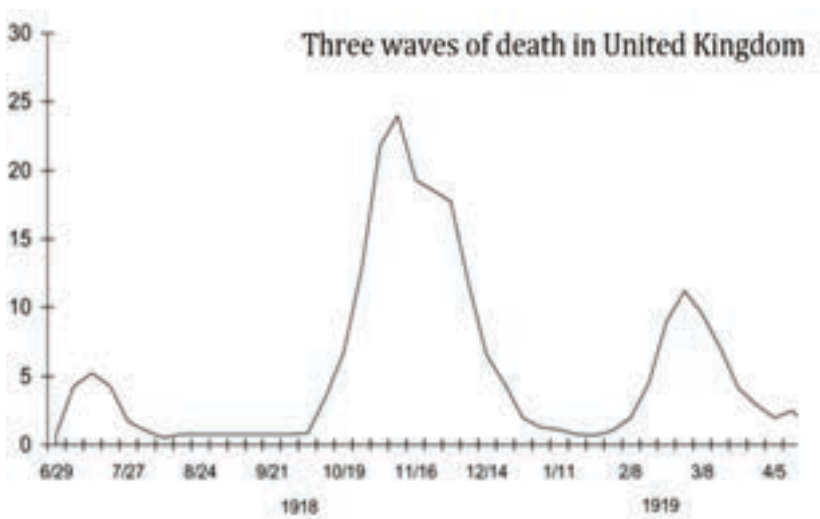
新興感染症	原因	初見	
プリオン病	プリオン	1920？ ()	異常なプリオン蛋白
マールブルグ病	マールブルグウイルス	1967(ドイツ)	アフリカから
エボラ出血熱	エボラウイルス	1976(スーダン)	
エイズ	ヒト免疫不全ウイルス	1983（フランス）	一本鎖RNAウイルス
高病原性鳥インフルエンザ	A型インフルエンザウイルス	1997(香港)	H5N1亜型
SARS	SARS-CoV	2002(中国)	一本鎖プラス鎖RNAウイルス
MERS	MERS-CoV	2012(サウジアラビア)	
COVID-19	SARS-CoV2	2019(中国)	6.36 億人報告661万人死亡 (2022/11/17)

ウイルス217種　細菌538種　菌類307種　原虫66種　寄生虫287種
（2001現在ワシントン大学：石弘之「感染症の世界史」より）

スペイン風邪1918-1920

ウイルス株	H1N1
最初の報告	アメリカ合衆国
場所	全世界
確定症例数	5億人（推計）
死者数	1億人以上（推計）

大英帝国の死亡者数の推移



日本の死亡者数の推移

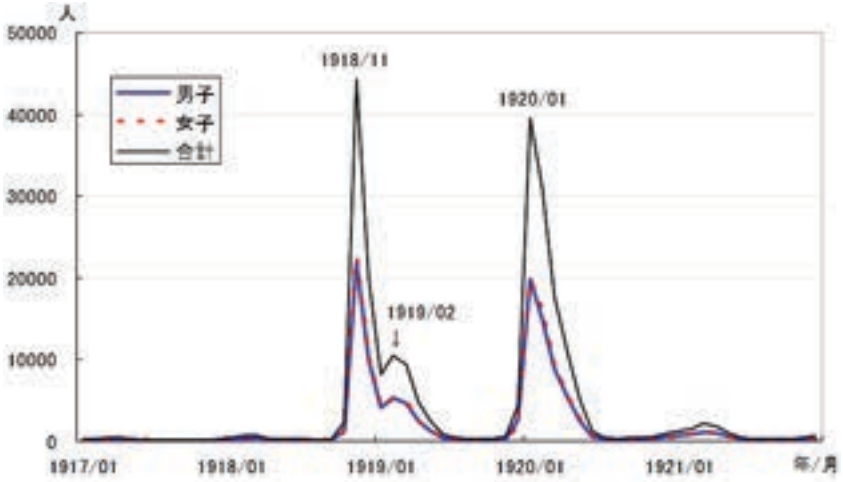


図1．インフルエンザによる死亡者数の月別推移

池田一夫，藤谷和正，難岡陽子，神谷信行，広門雅子，柳川義勢
日本におけるスペインかぜの精密分析
東京健安研セ年報Ann.Rep.TokyoMetr.Inst.P.H.,56, 369-374, 2005

感染症のコンパートメント（区画）モデル

人をいくつかの区画に分けて考え、感染症がどのように広がり、どのように収束するかを明らかにする

最も単純なモデル：SIRモデル

スペイン風の流行を理解するために考えられた

W. O. Kermack and A. G. McKendrick,
”A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics”,
Proc. Roy. Soc. A**115**, 700-721 (1927).

S	I	R
未感染者 罹患可能性のある人	感染・発症 ・感染力	治癒＝免疫 死亡

SIR モデルによる感染曲線など

“化学反応“方程式

$$S + I \overset{\beta}{=} 2I \quad \text{2次反応}$$

$$I \overset{\gamma}{=} R \quad \text{1次反応}$$

$$\beta S I - \gamma I$$

$$=(\beta S - \gamma) I$$ だけ I は 変化する

$\beta S > \gamma$ なら増加　$\beta S < \gamma$ なら減少

通常は実効再生産数 $R = \frac{\beta S}{\gamma}$ を定義し、
$R>1$ または $R<1$ で傾向を表す

感染初期は

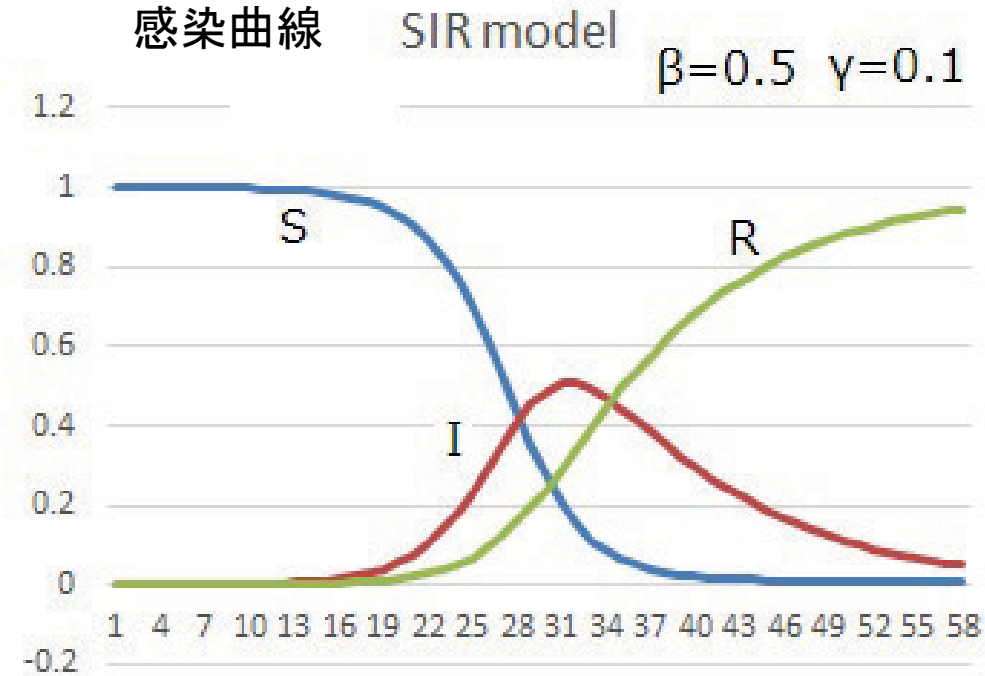
$S = N$ (全人口) $I, R \ll 1$

$$R_0 = \frac{\beta N}{\gamma}$$ 基本再生産数

β ウイルスの特徴
市民の行動による

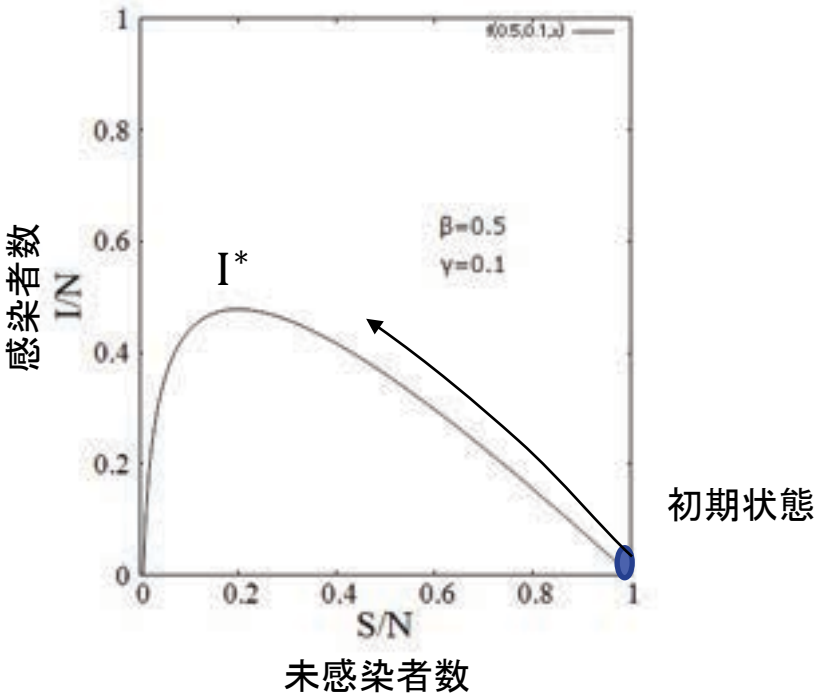
γ 治癒率＋死亡率

感染曲線

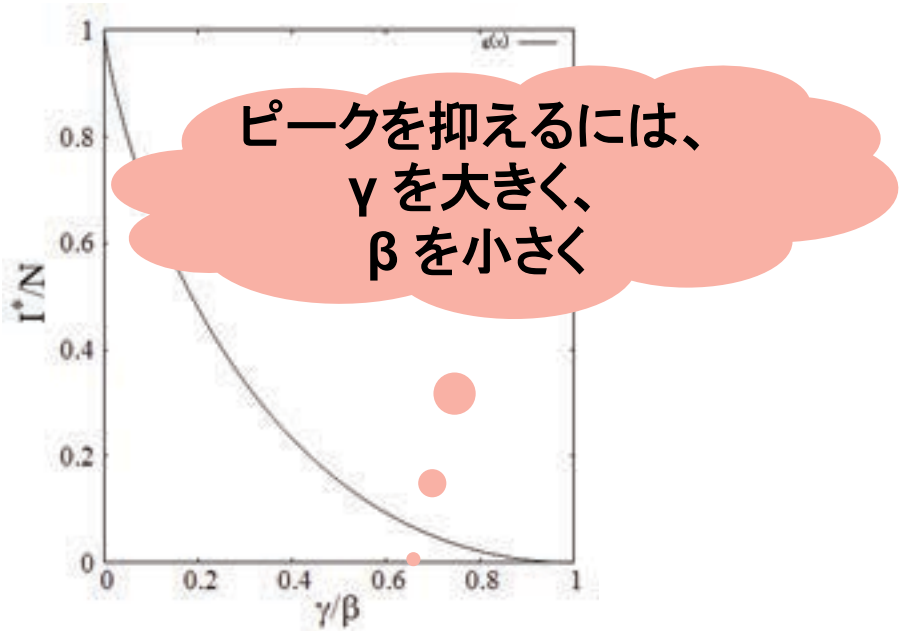


SIR モデルによる感染曲線など

S-I 曲線



ピークは γ/β で決まる



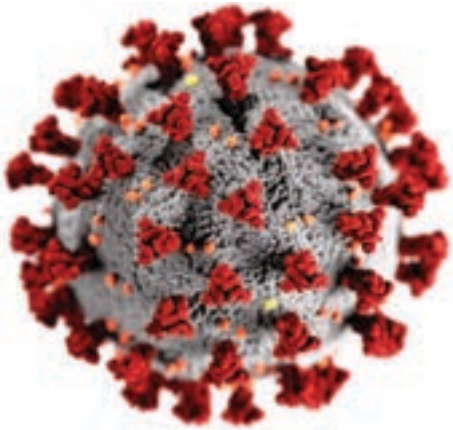
SEIR モデル

潜伏期間の人を別の区分にする

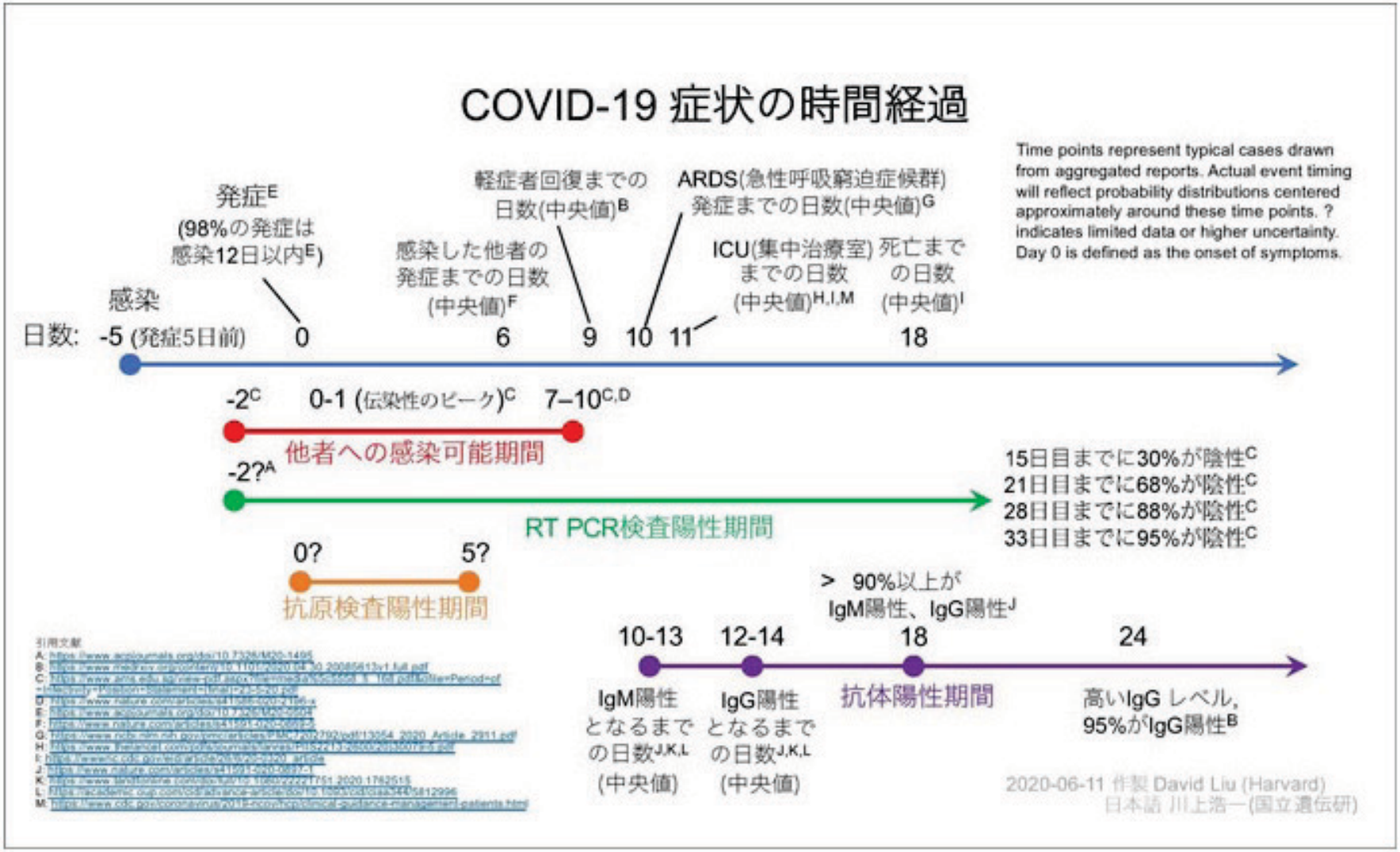
S	E	I	R
未感染者	感染者	発症・感染力	治癒＝免疫 死亡

感染率の変化としてSIRモデルに取り込める

2. COVID-19の特徴



SARS-CoV2

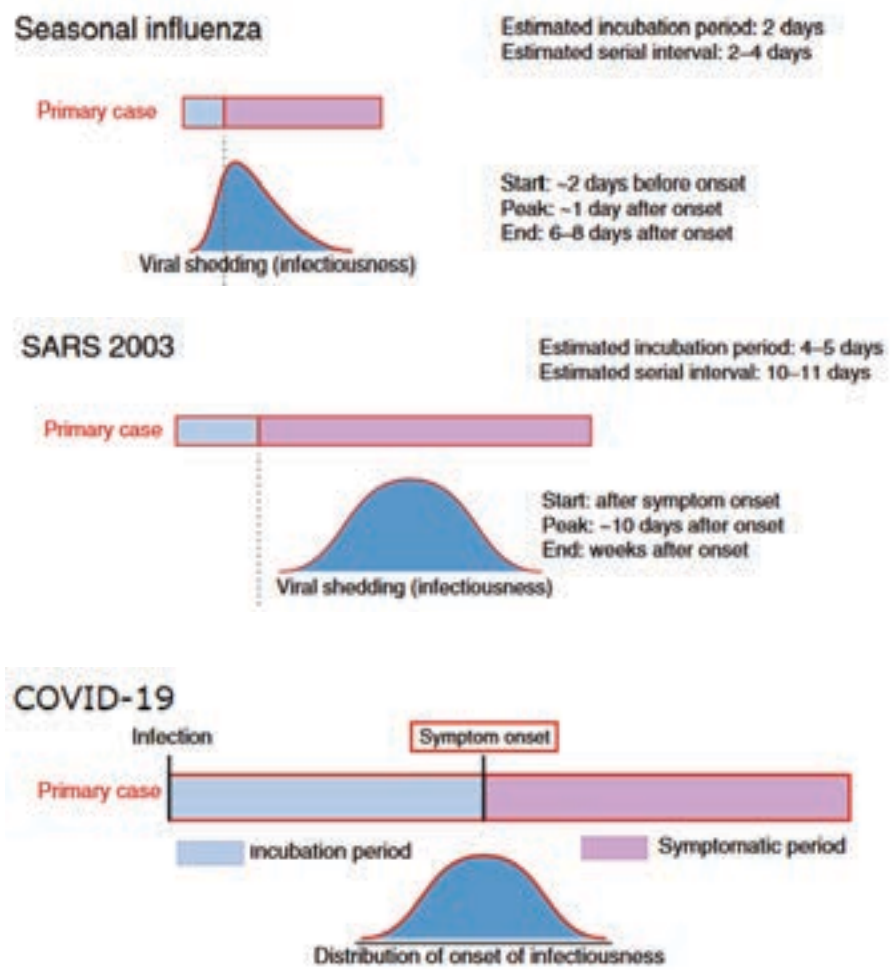


David R. Liu on Twitter

川上浩一(国立遺伝研)訳

感染期間の比較

From He X etal (2020)
Nature Med 26, 672

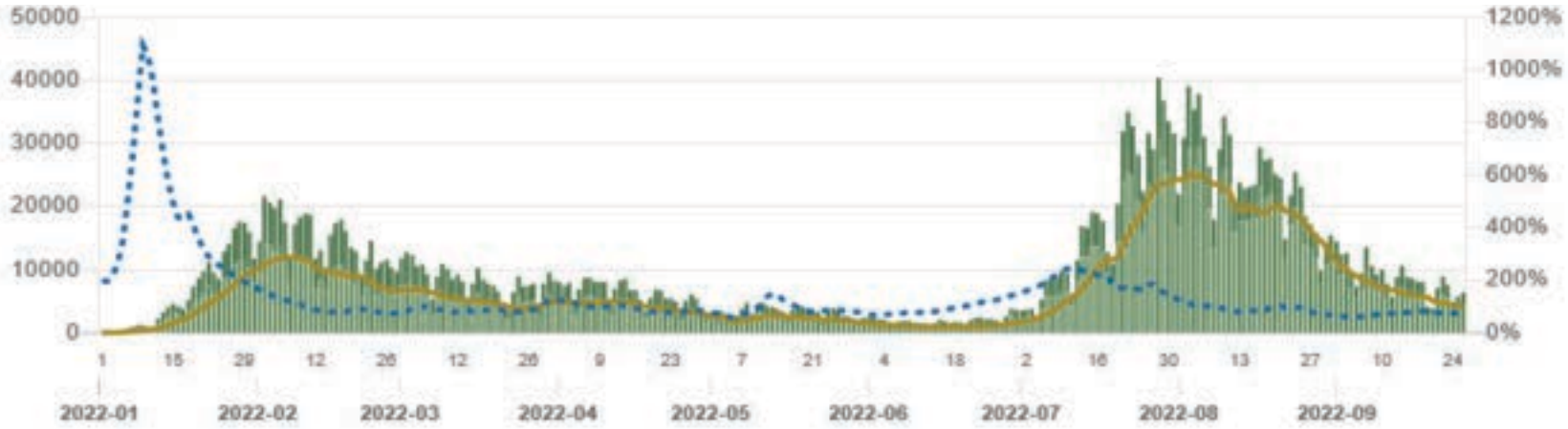


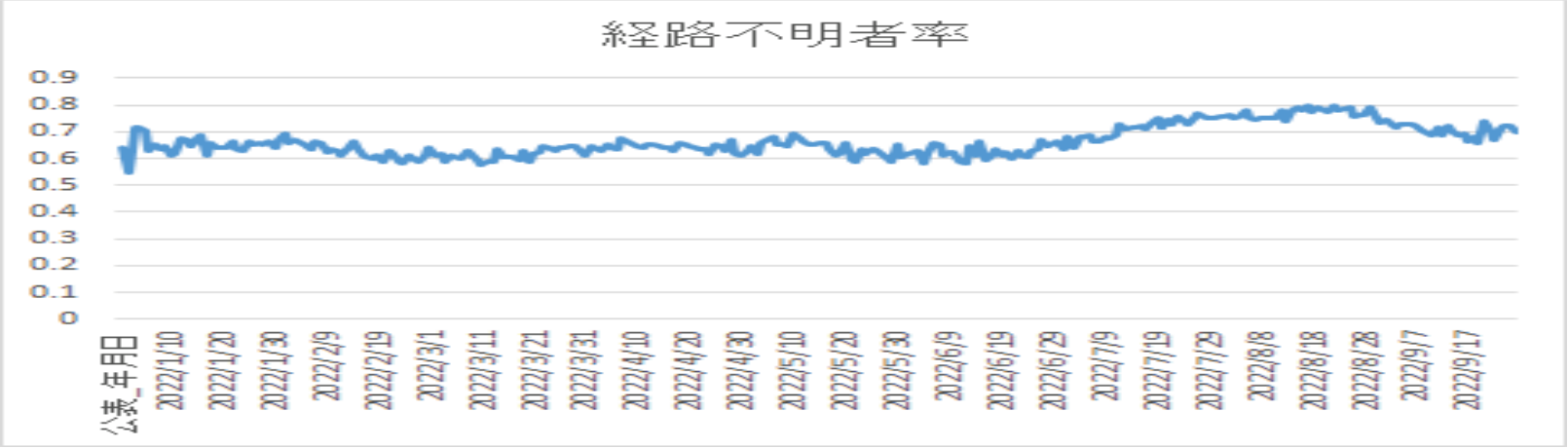
Oxford University

Presymptomatic	46%
Symptomatic	38%
Asymptomatic	10%
Other	6%

From Ferretti L et al (2020)
Science 368,6491

感染経路判明者/不明者数　東京都(2022/1/1~9/26)





考慮すべきCOVID-19の性質

- PCR検査により感染者を特定できる
- 潜伏期間が長く、発症前に感染力を持つ
- 無症状感染者が多い

  ・豊中の小学校の例(2021年4月）

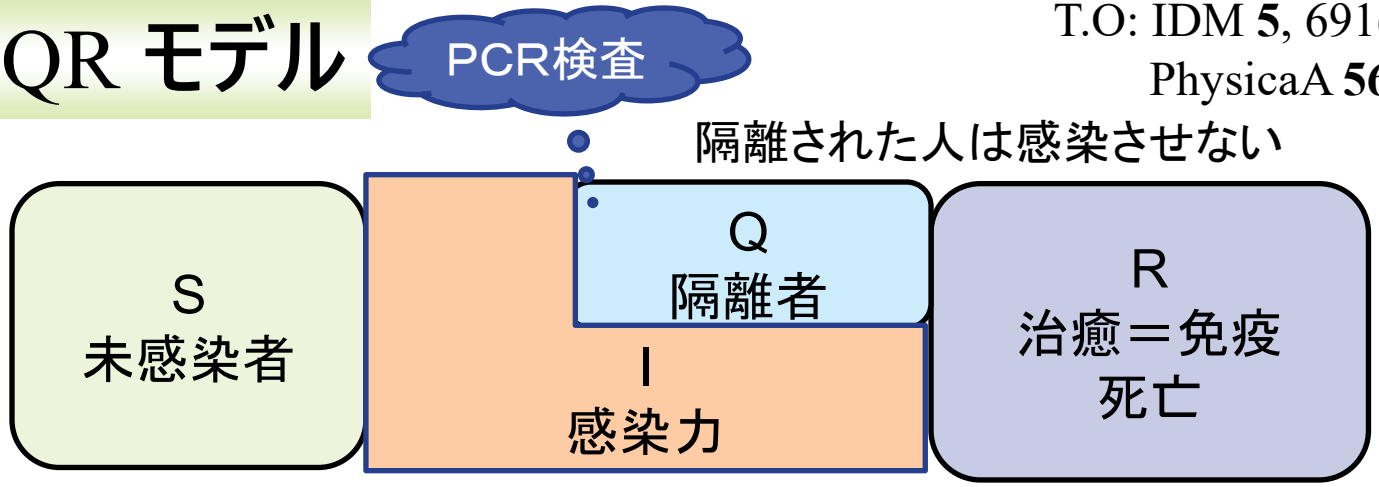
  875 人検査12名陽性、内11名無症状
- 無症状感染者も、感染力を持つ
- 感染経路不明者が多い
- 波打つ感染曲線

適切なコンパートメントは何か？

新しいコンパートメント モデル

SIQR モデル

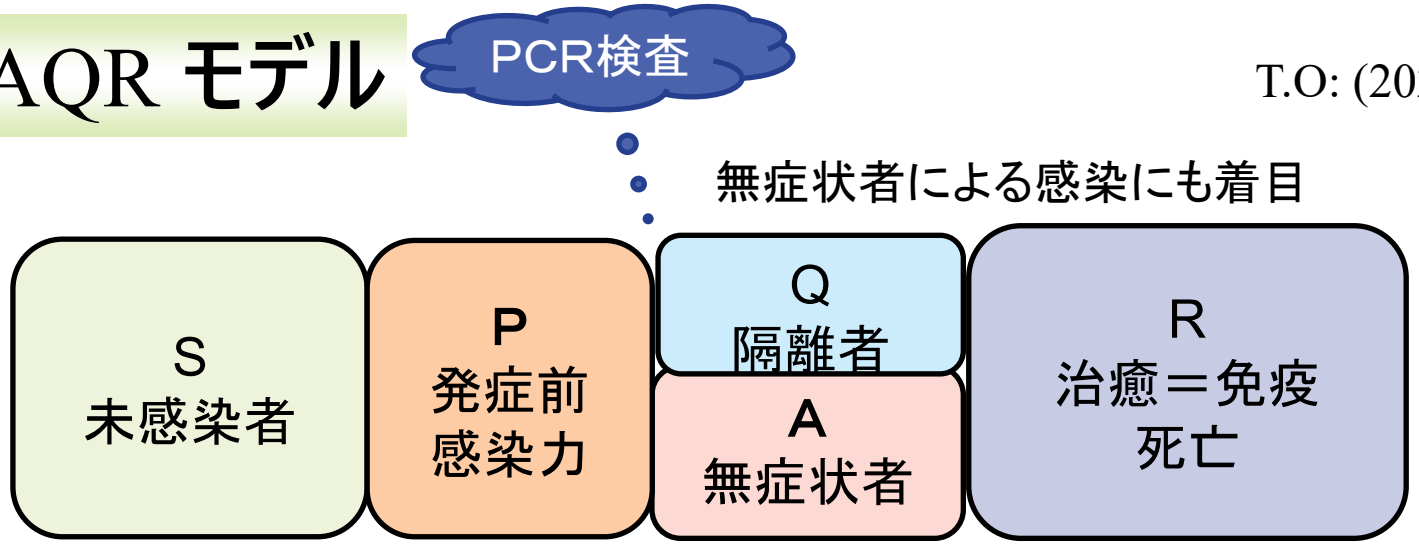
T.O: IDM **5**, 691(2020)
PhysicaA **564**, 125564 (2021)



日毎陽性者数と市中感染者数の関係が分かる

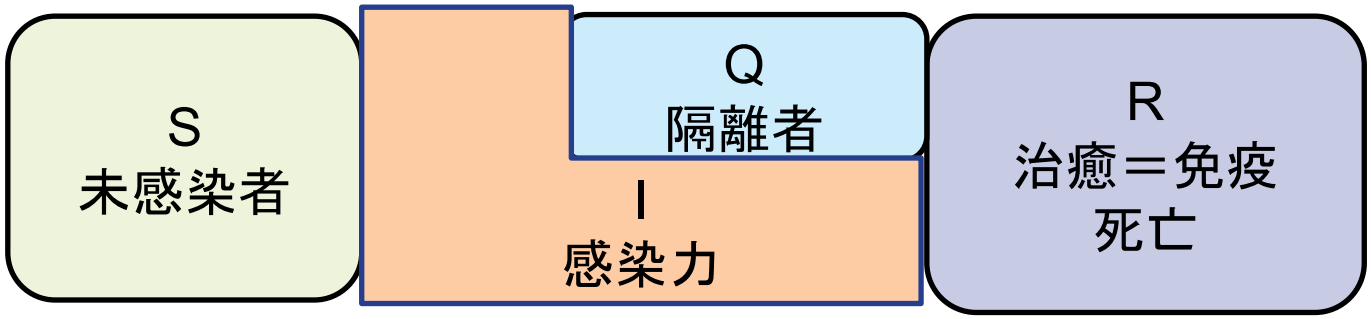
SPAQR モデル

T.O: (2022)



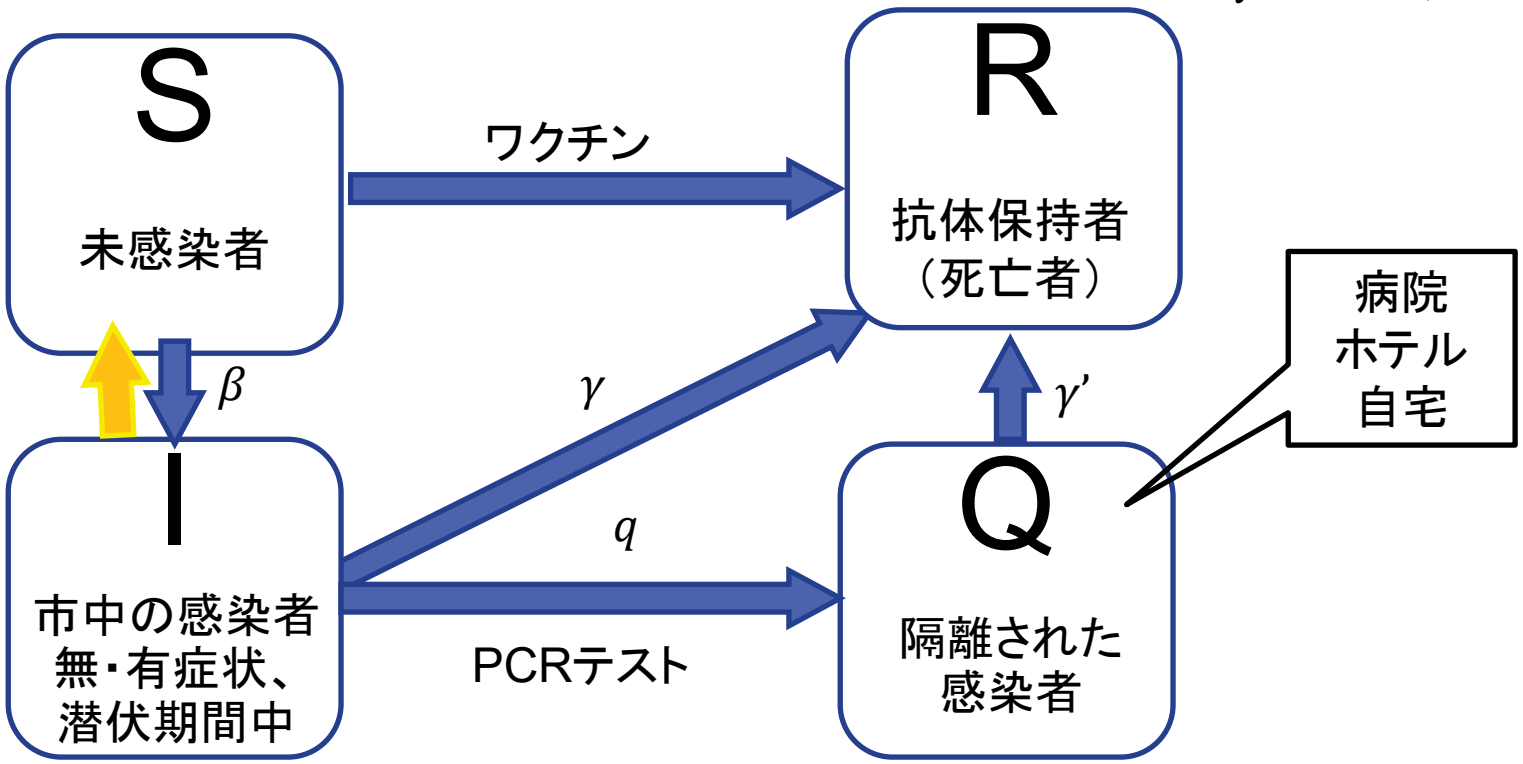
感染経路不明者数と発症率・市中感染者数の関係が分かる

3. SIQRモデル



SIQR モデル

物性研究電子版**8**,082101(2020)
IDM **5**, 691(2020)
PhysicaA **564**, 125564 (2021)



β：感染確率＊接触率

γ，γ'：治癒率

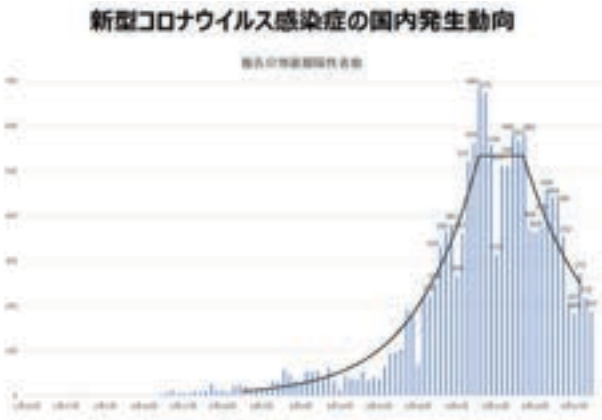
q：隔離率

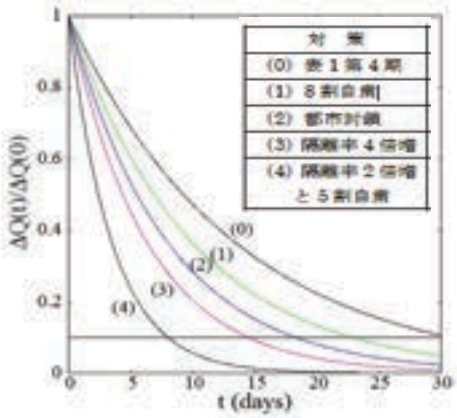
PCR テスト：治療のための判断としてやるのか
無症状者を含め隔離のためにやるのか

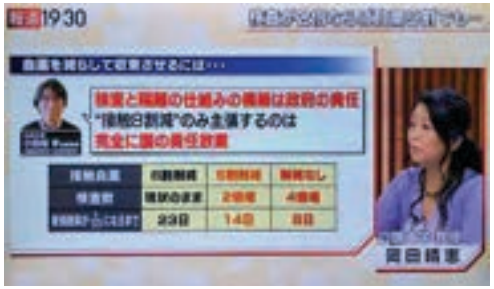
アウトブレイク初期の分析

物性研究電子版**8**,082101(2020)

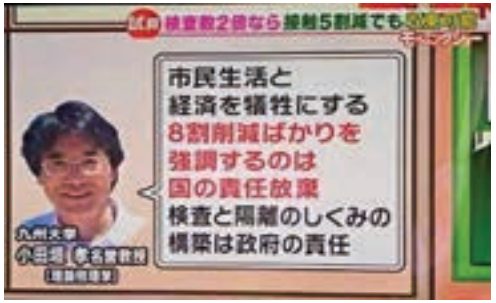
IDM **5**, 691(2020)





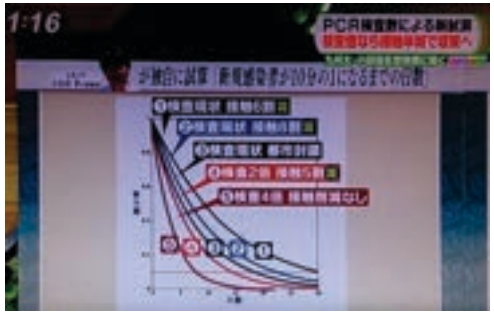


BSTBS 報道1930



羽鳥慎一モーニングショー

BS朝日日曜スクープ

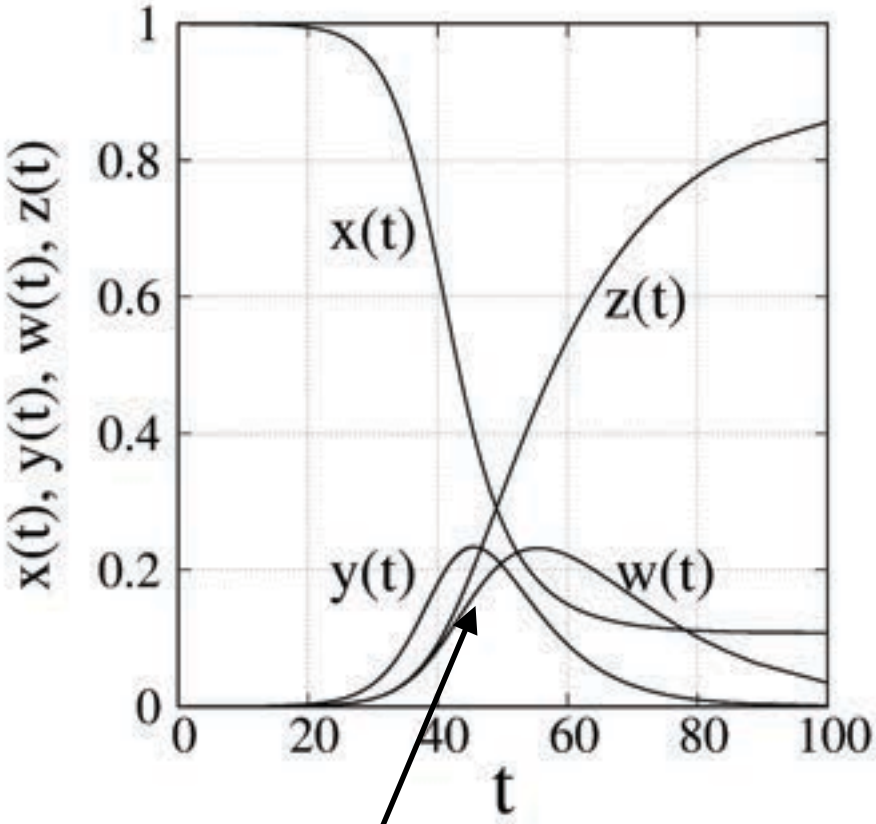


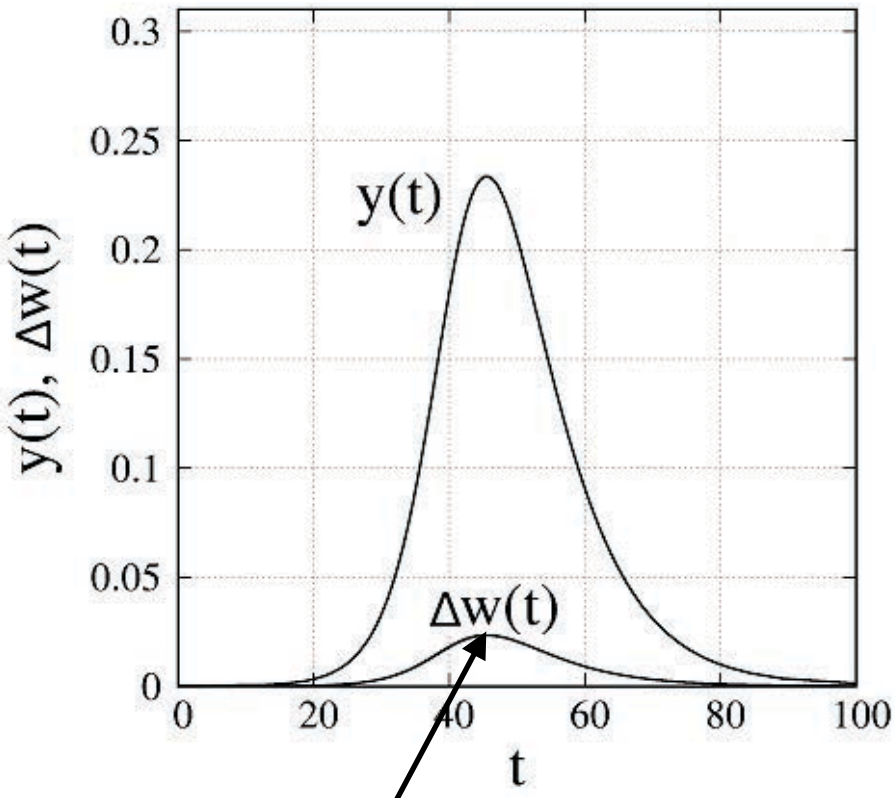
TBS ひるおび

テレQ取材

感染（厳密解）の特徴

$\beta = 0.4, q = 0.1, \gamma = \gamma' = 0.06$ TO:Physica A**564**, 125564(2021)





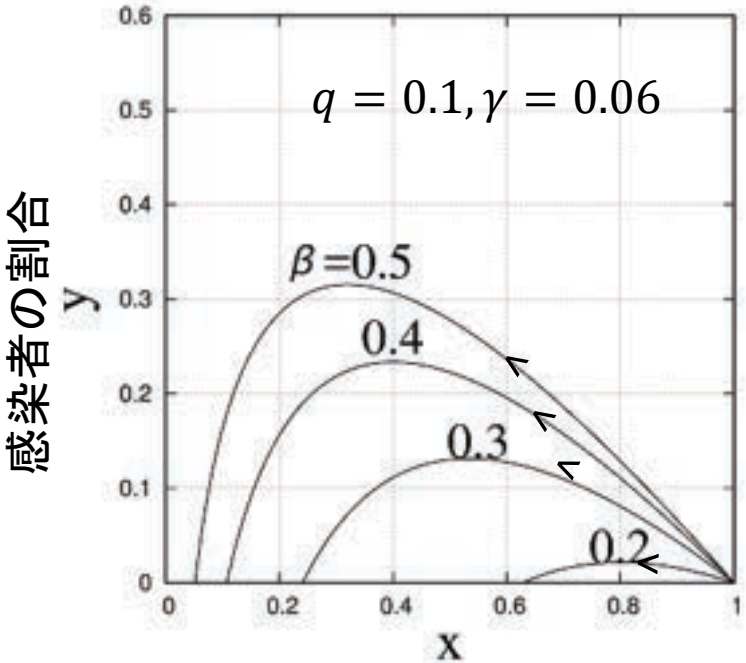
感染者数と入院者数の
ピークがずれる

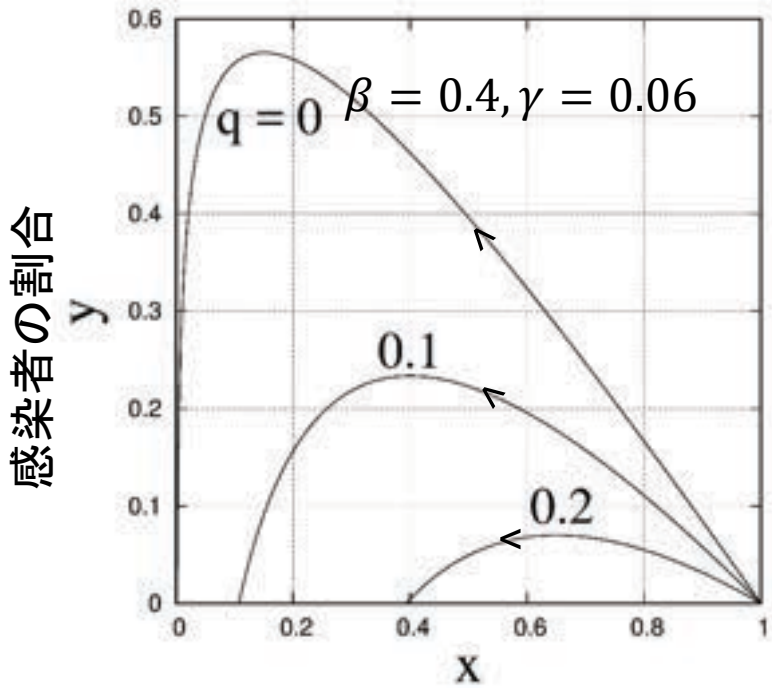
感染者数は日ごと陽性
者数の 1/q 倍多い

基本的性質

1. 感染者数 vs 未感染者数

初期条件: $x = 1, y = 0$





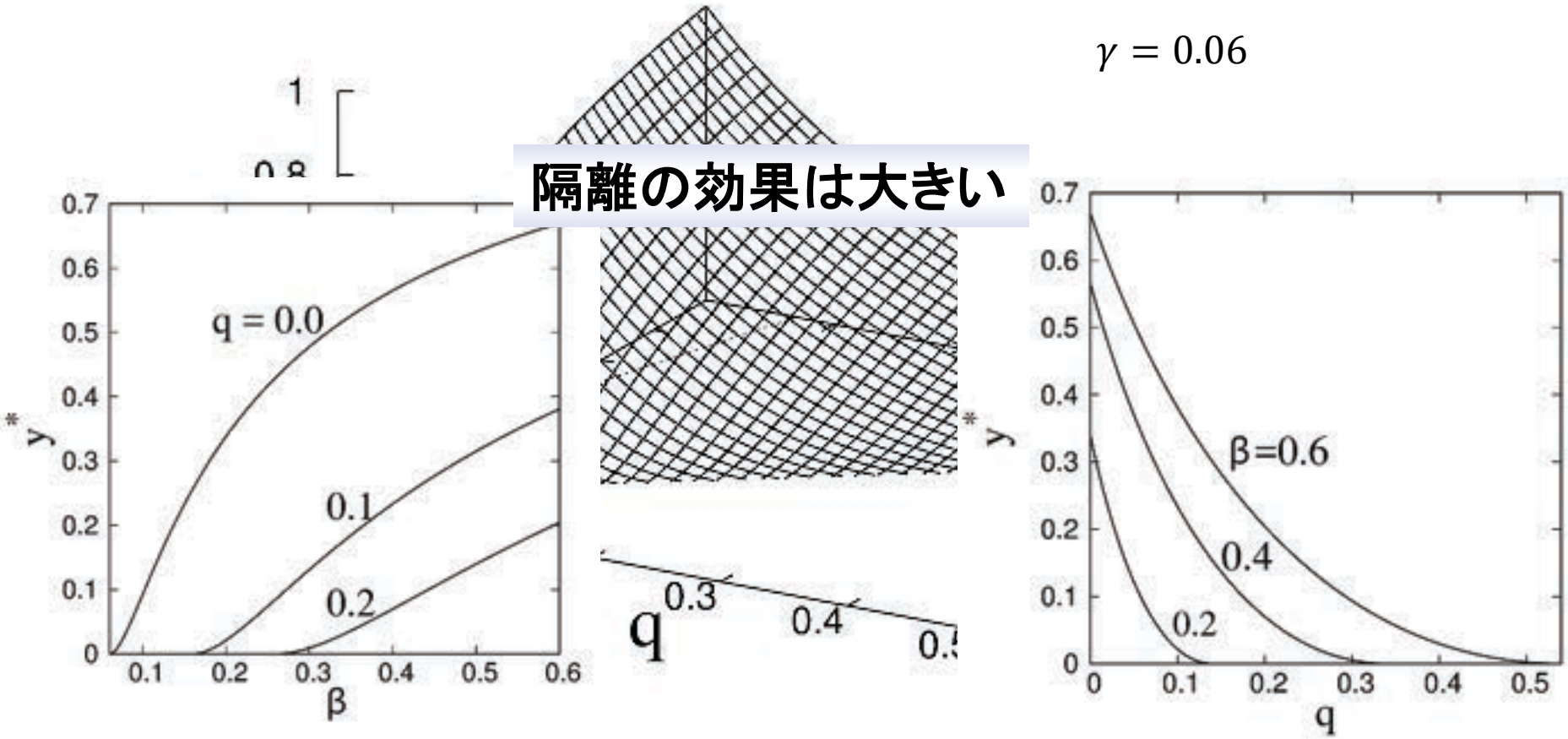
基本的性質

2. ピークの位置・高さ

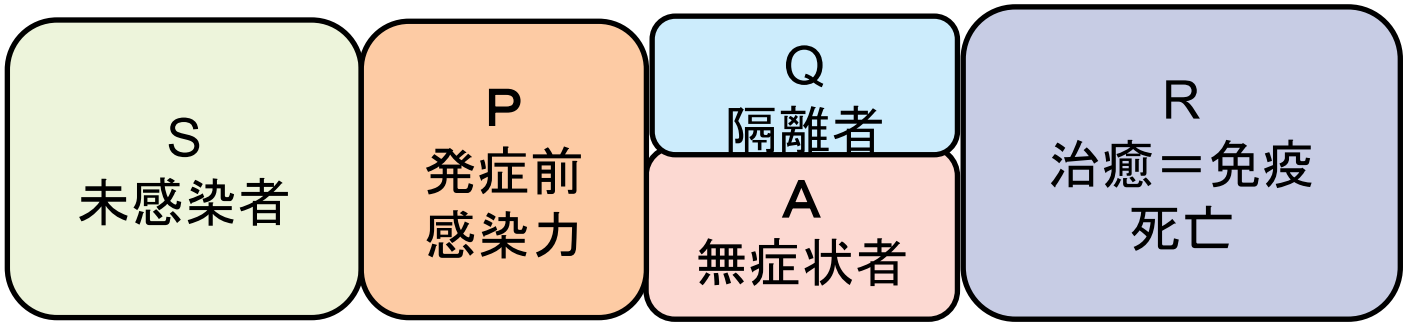
$$x^* = \frac{q+\gamma}{\beta}, \quad y^* = 1 - \frac{q+\gamma}{\beta} + \frac{q+\gamma}{\beta}\ln\frac{q+\gamma}{\beta}$$

$\gamma = 0.06$

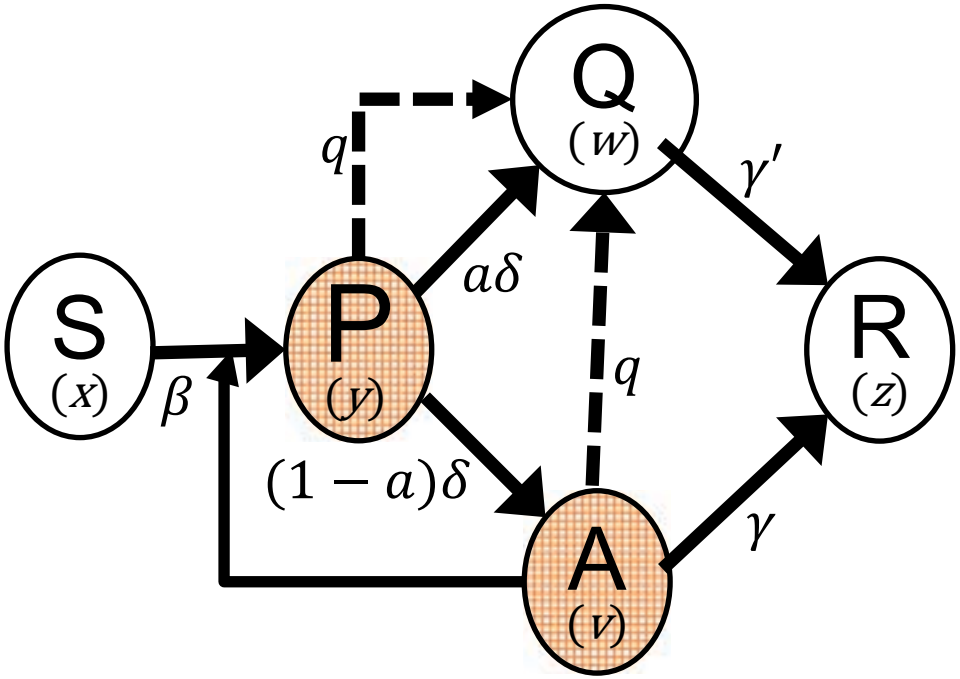
隔離の効果は大きい



4. SPAQRモデル



感染経路不明者がなぜ多いか？



δ P→(A,Q)進行率

a 発症率

$$x = \frac{S}{N}, \quad y = \frac{P}{N}, \quad z = \frac{R}{N}$$

$$v = \frac{A}{N}, \quad w = \frac{Q}{N},$$

(N : 全人口)

日毎新規感染者数 $\Delta Q = a\delta y + qy + qv$

感染力を持つ感染者数 $\mathfrak{I} = y + v \equiv \mathcal{F}\Delta Q$

隔離者数 $Q(t)$

感染経路不明者の割合 $f = \frac{(1-a)y+v}{y+v}$

無症状者から感染した人の割合

パラメータ

$a = 0.75 \quad \gamma = 0.13$

$\gamma' = 0.1 \quad \delta = 0.2$

$q = 0 \sim 0.2 \quad \beta = 0.2 \sim 0.4$

初期条件

$x = 0.999$

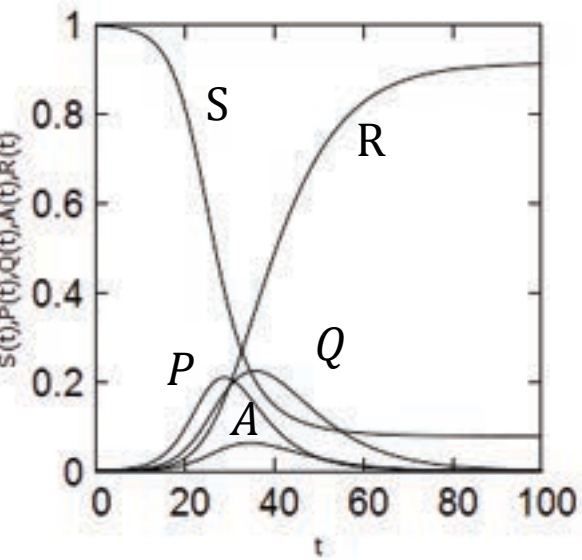
$y = 0.001$

$v = w = z = 0$

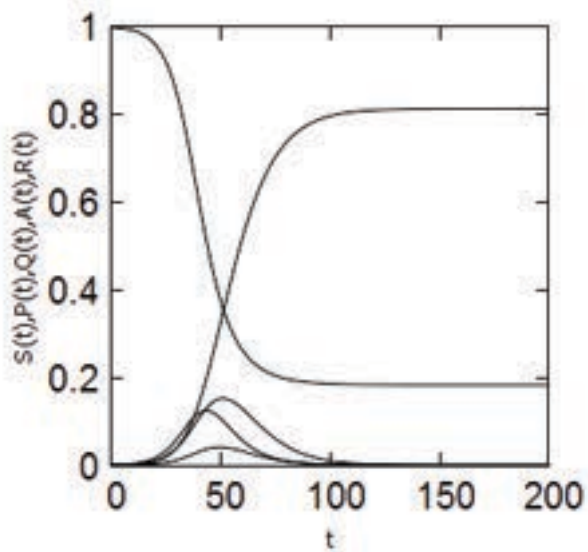
感染曲線

$q = 0$ 対策としてのPCR 検査なし

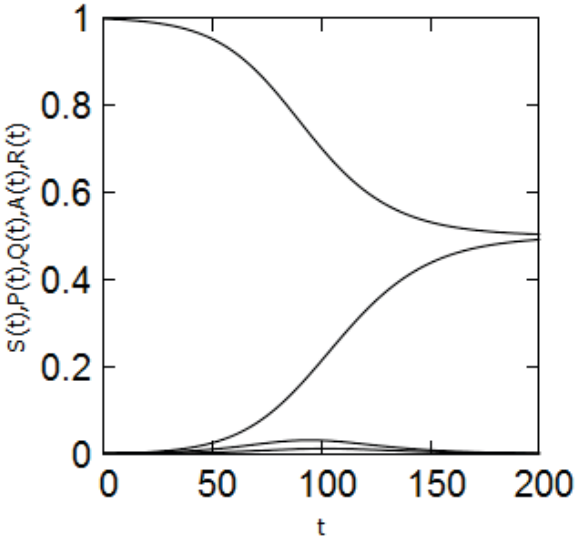
$\beta = 0.4$



$\beta = 0.3$



$\beta = 0.2$

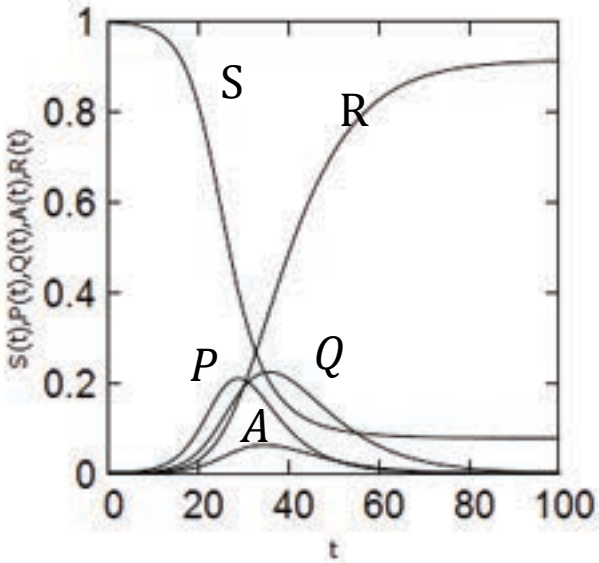


行動自粛

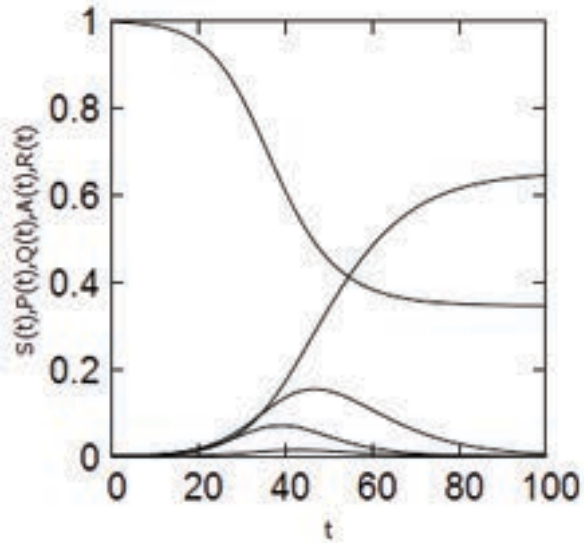
感染曲線

$\beta = 0.4$　弱い行動自粛

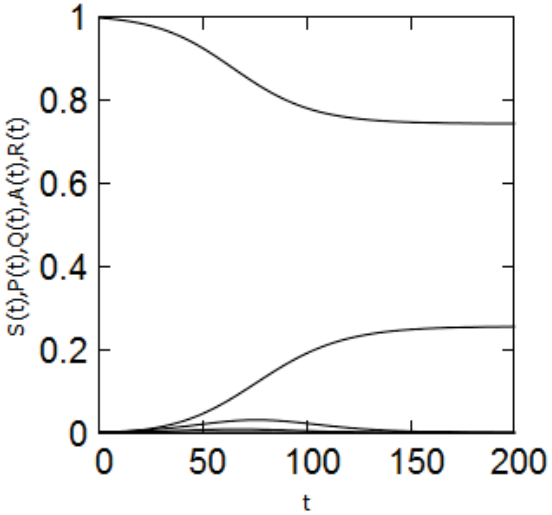
$q = 0$



$q = 0.1$



$q = 0.2$

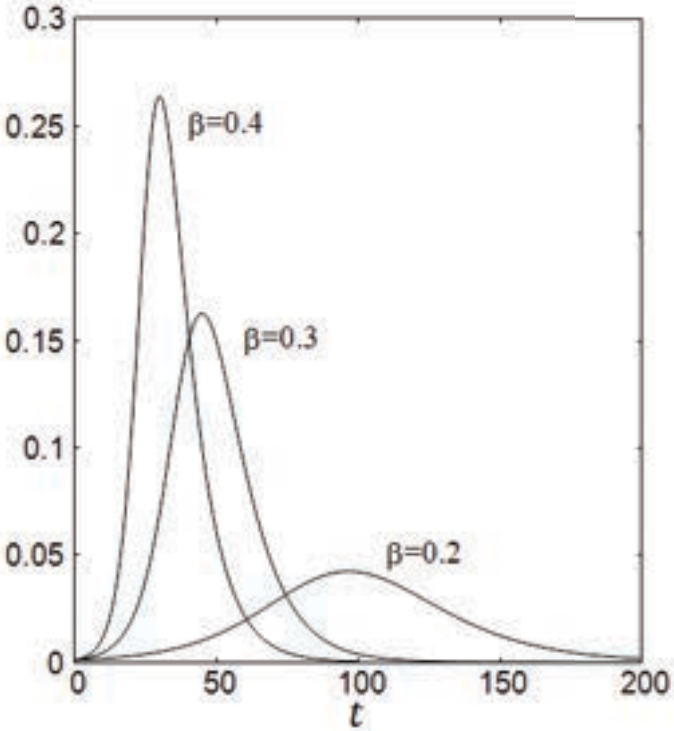


PCR 検査強化

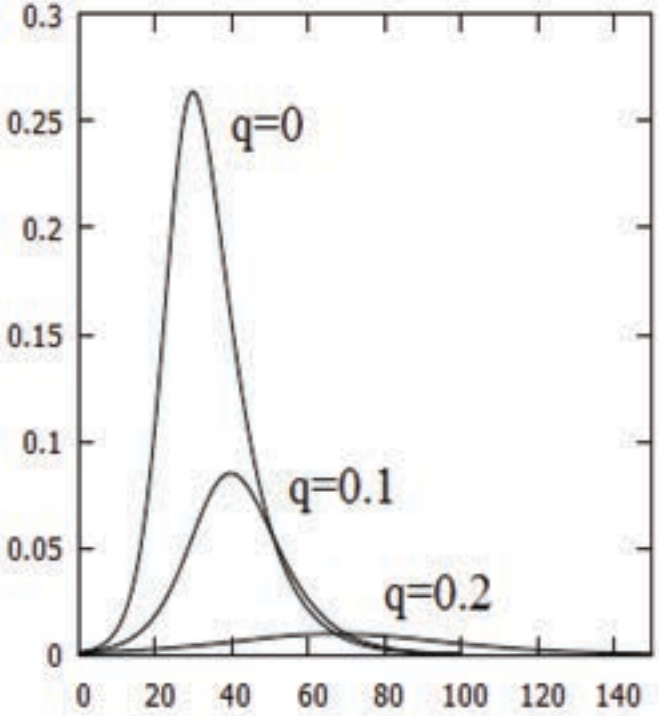
市中感染者数

$$P + A$$

$$q = 0$$

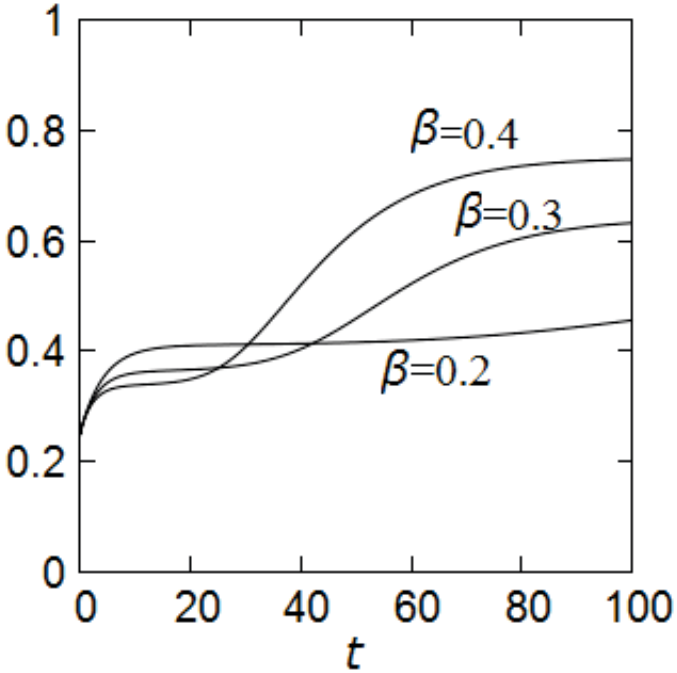


$$\beta = 0.4$$

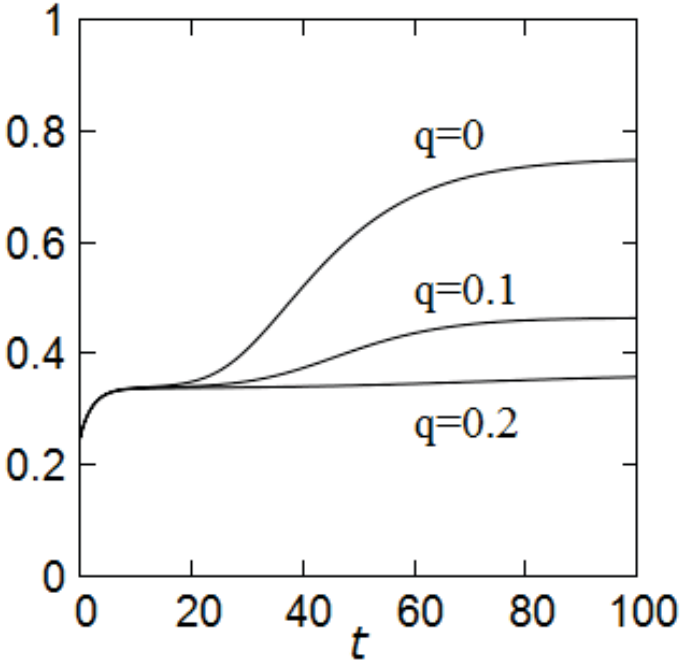


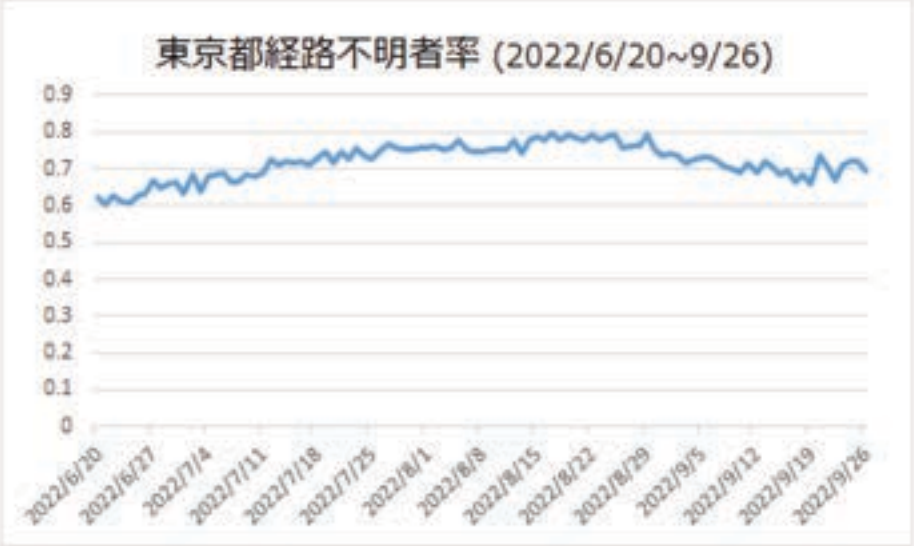
感染経路不明者の割合

$q = 0$



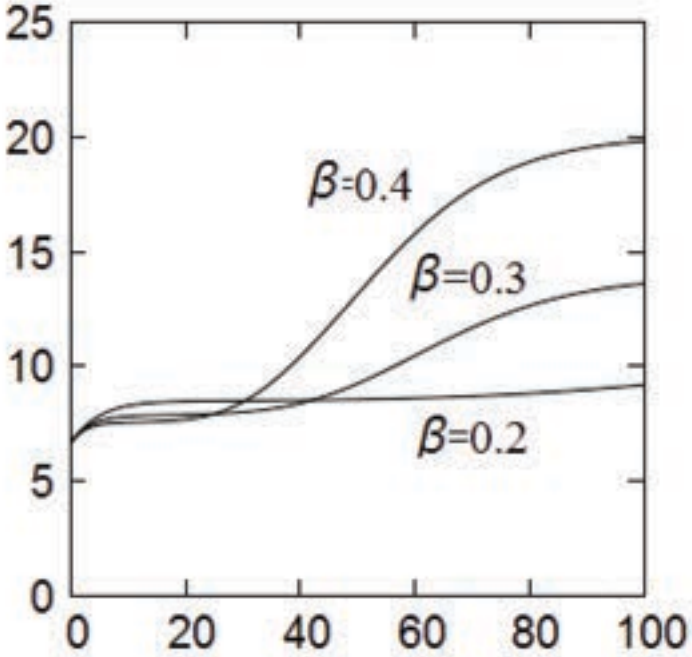
$\beta = 0.4$



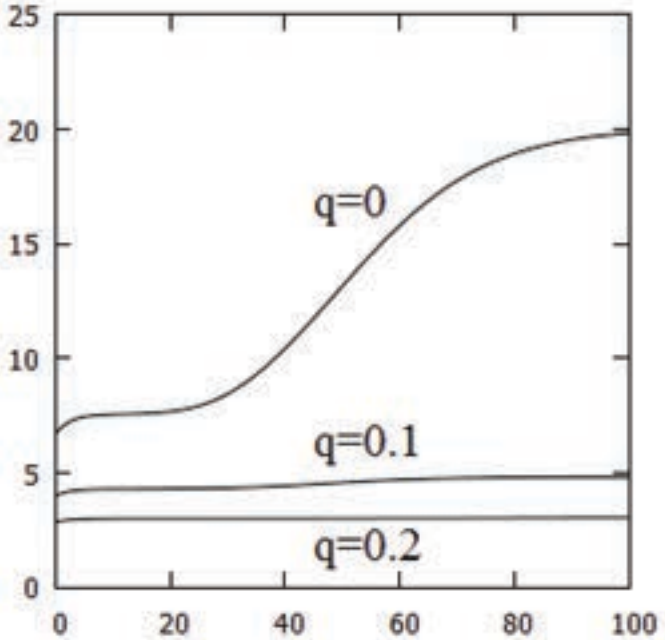


市中感染者数/日々陽性者数

$q = 0$



$\beta = 0.4$



結　論

1. q　の効果大

発症前/無症状感染者の検査による発見・隔離が重要

⇦日本では、検査は主に有症状者がコロナに感染しているかどうかの判断するために用いられ、パンデミック対策としては用いられていない

2. 感染経路不明者の割合の活用

発症率や市中感染者と新規陽性者数の関係が推定できる

5. 他の話題

感染状況の分類

感染曲線の振動の原因

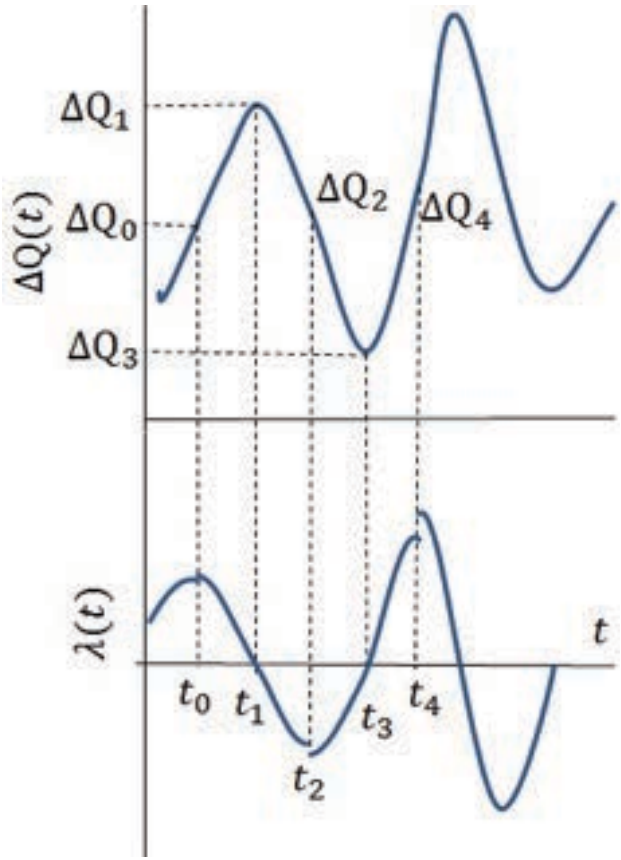
集団免疫

日本ではなぜ収束しないか

感染状況の分類

T.O & R. Suda: Journal of Clinical Trials (2021)

感染曲線（日ごと陽性者数）



ΔQ の変曲点ー極値ー
変曲点で区間に分ける

ΔQの連続性を要請
各区間で exp(3次関数)

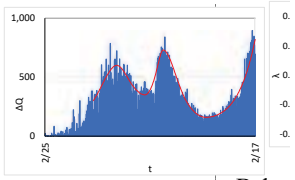
増減率

$$\lambda(t) = \frac{d\log\Delta Q(t)}{dt}$$

を各区間で2次関数で近似

(a)Trend I : Stage 1

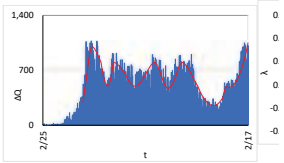
(a1) I-1_3



Bahrain

(b)Trend I : Stage 3

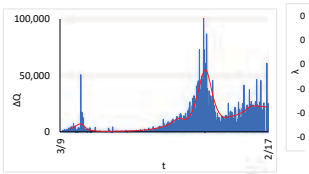
(b1) I-3_5



Kuwait

(c)Trend S : Stage 2

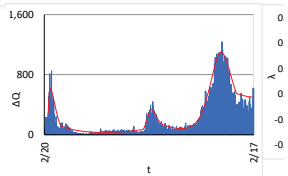
(c1) S-2_3



France

(d)Trend S : Stage 4

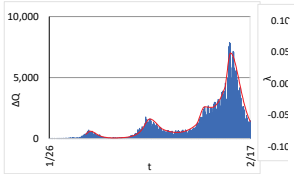
(d1) S-4_3



South Korea

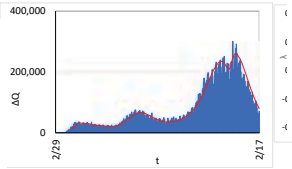
(e)Trend D : Stage 3

(e1) D-3_3



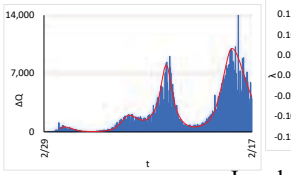
Japan

(e2) D-3_3



USA

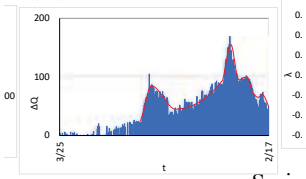
(e2) D-3_3



Israel

(f)Trend D : Stage 5

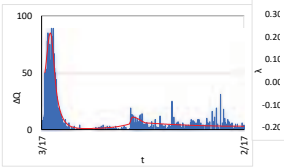
(f1) D-5_2



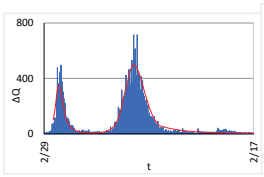
Syria

(g)Trend C : Stage 4

(g1) C-4_2



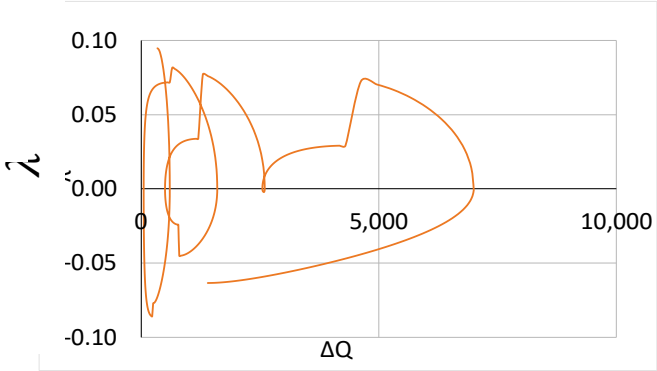
New Zealand



Australia

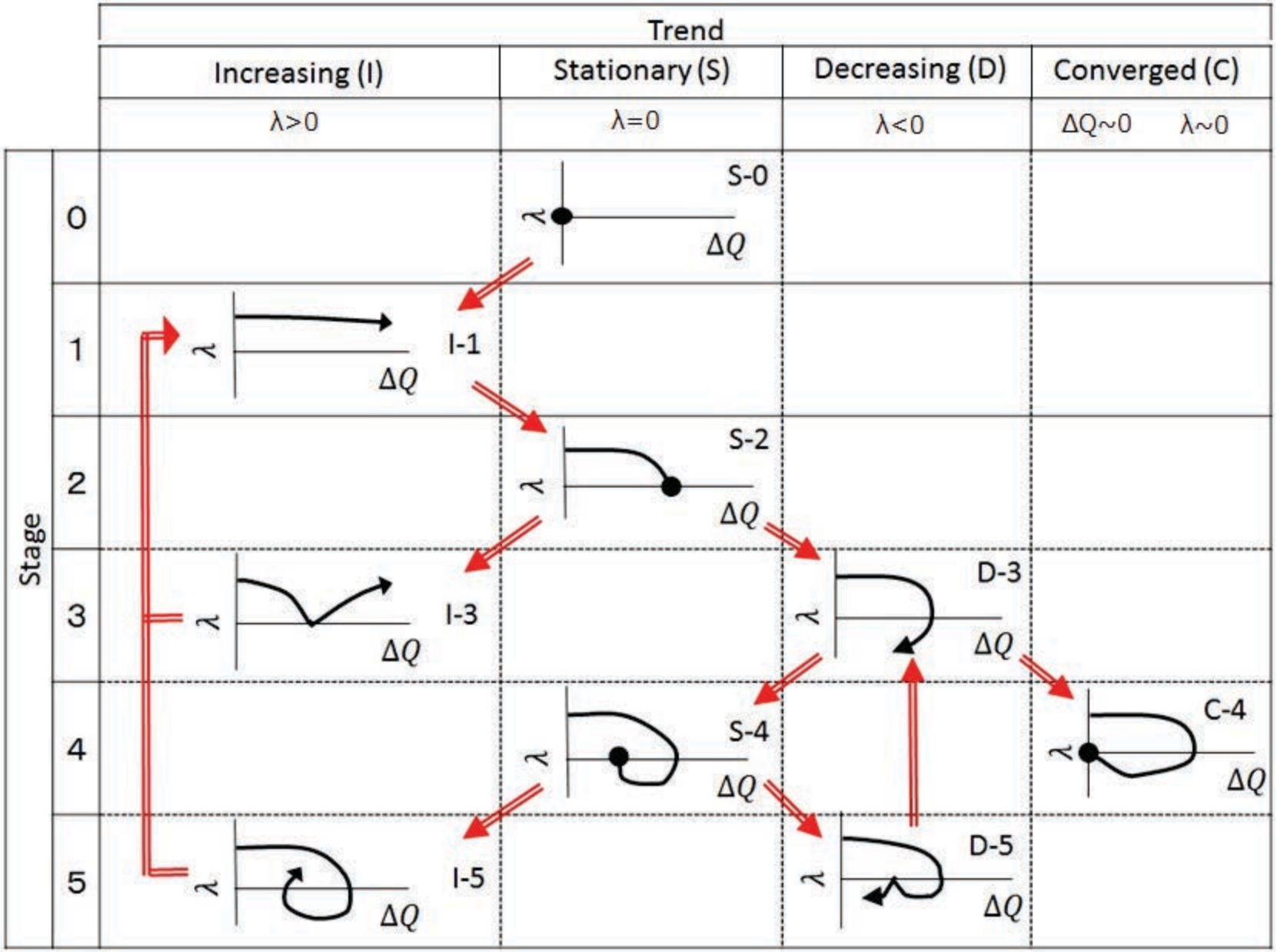
感染状況図

増減率を感染者数の関数として表す

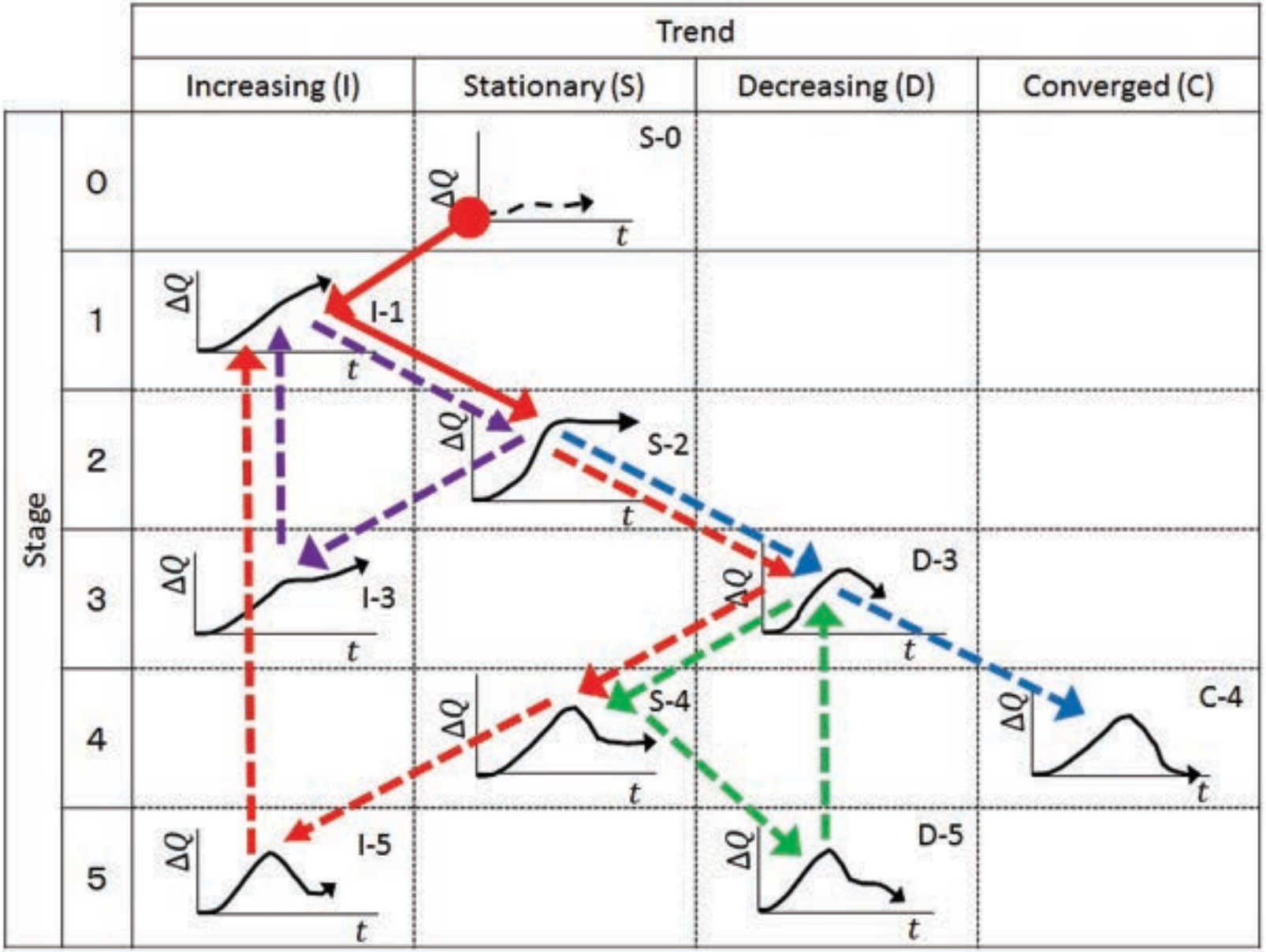


ΔQ

感染状況の分類 $\mathrm{T}-\mathrm{s}_n$



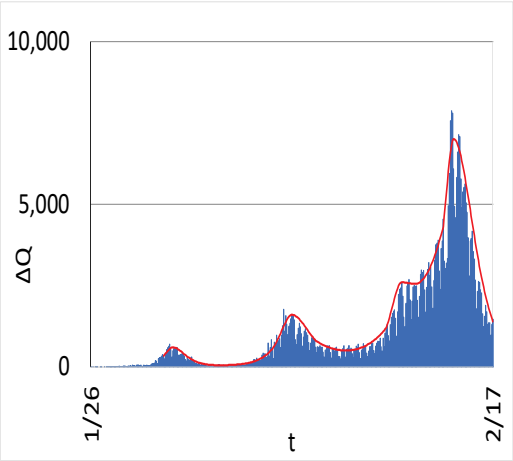
日毎新規陽性者数 $T - s_n$

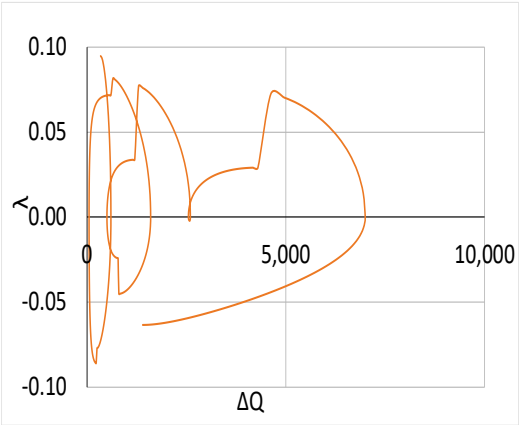


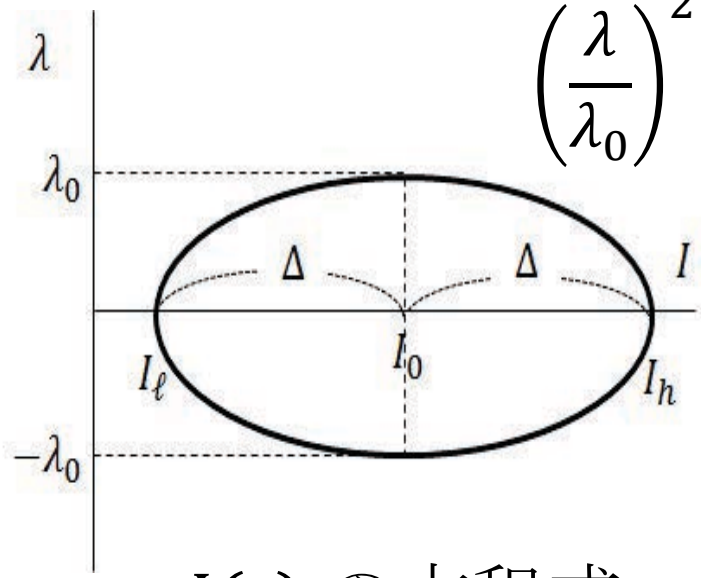
感染曲線の振動

T.O：Scientific Reports**11**, 1936(2021)
PhysicaA**573**, 125925(2021)

増減率λと$\Delta Q(\mathrm{I})$は強く相関している







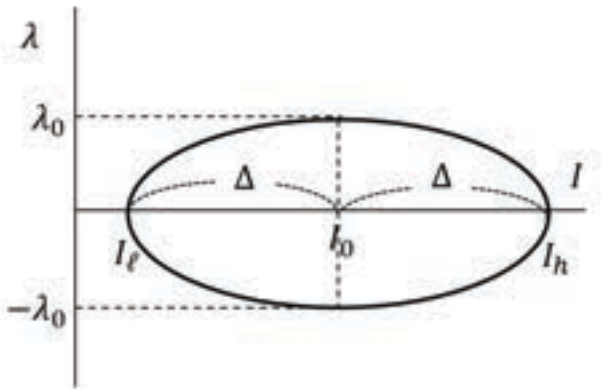
$$\left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 + \left(\frac{I - I_0}{\Delta}\right)^2 = 1$$

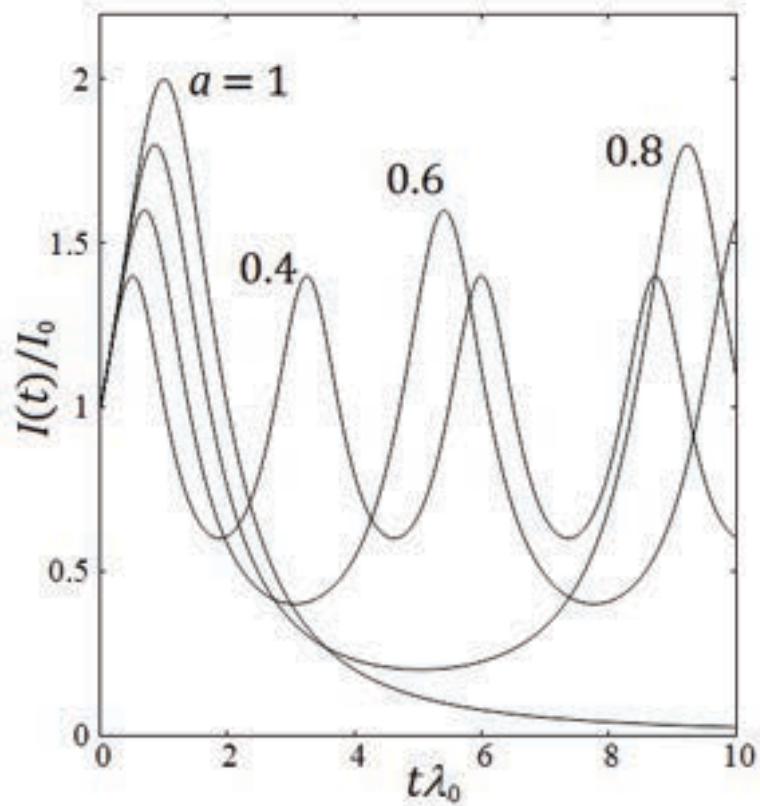
$I(t)$ の方程式

$$\frac{dI(t)}{dt} = \lambda(I)I(t)$$

$a = \Delta/I_0$の値で様子が異なる

$a < 1$：振動

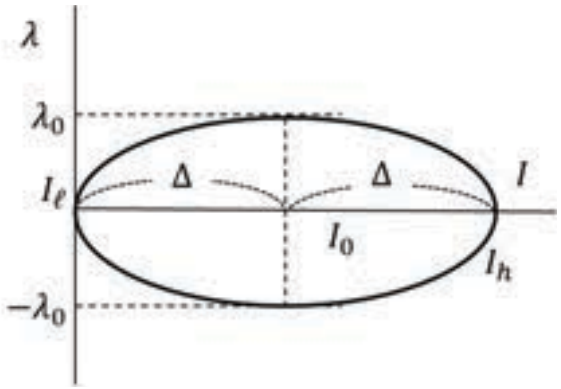


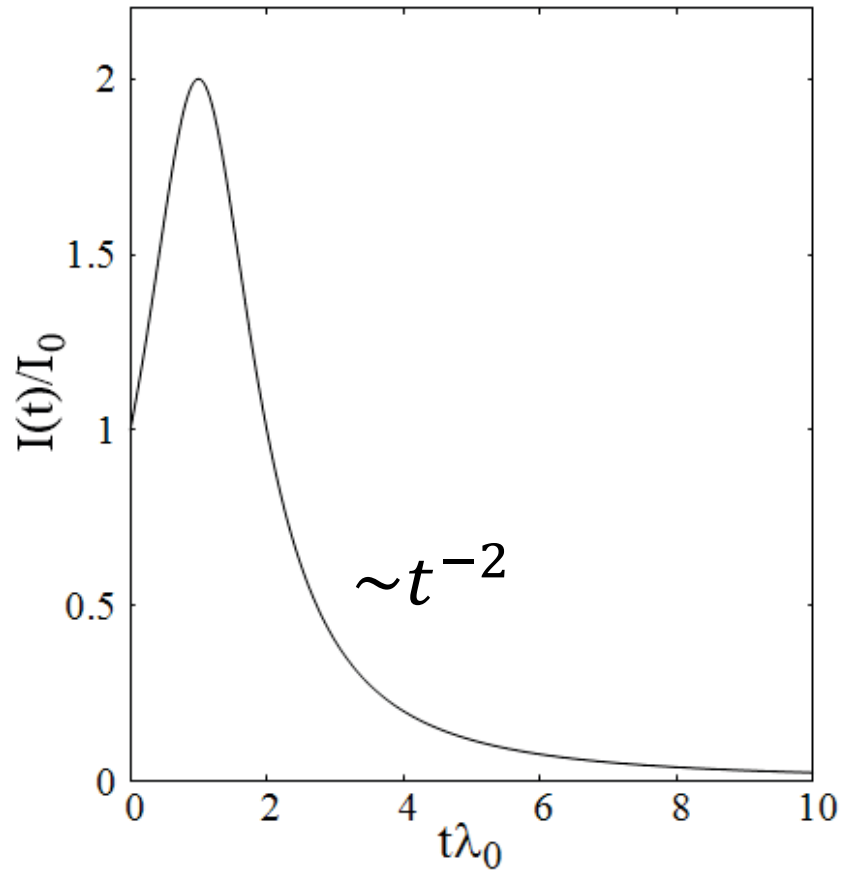


- I_h と I_ℓ の間を振動
- 周期は

$$T\lambda_0 = \frac{4\pi(I_h - I_\ell)}{\sqrt{I_h I_\ell}}$$

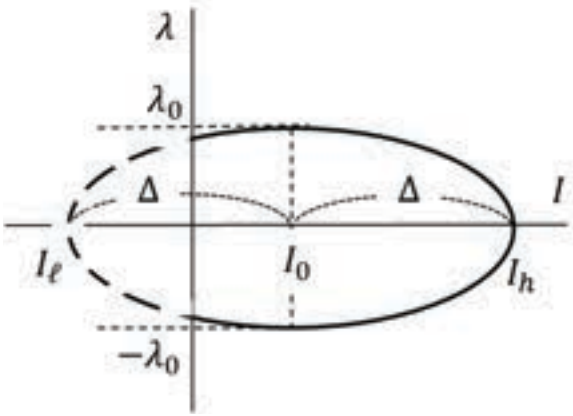
$a = \Delta/I_0 = 1$:臨界的

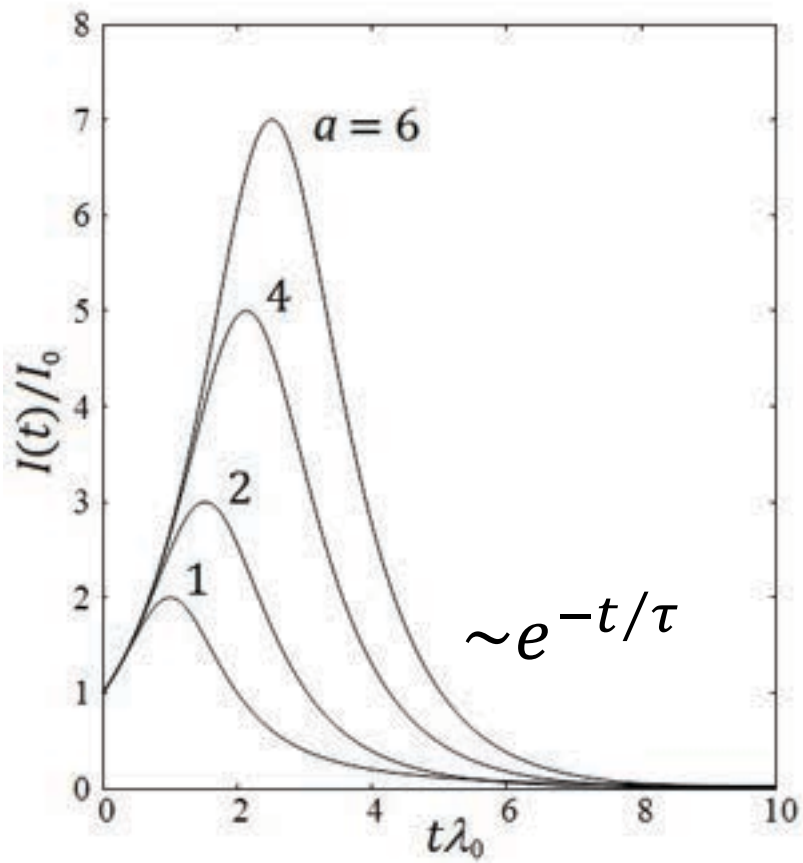




- $t\lambda_0 = 1$ で最大値$I_{\max}/I_0$=2
- $t \to \infty$で、$\sim t^{-2}$ で減衰

$a > 1$: 一山で減衰





- $t\lambda_0 = \frac{a}{\sqrt{a^2-1}} \ln(a + \sqrt{a^2-1})$で
  最大値 $I_{\max}/I_0$=1+a
- $t \to \infty$での減衰定数
  $\tau\lambda_0 = \frac{a}{\sqrt{a^2-1}}$

この政策が必要！！

集団免疫

これまでの考え方

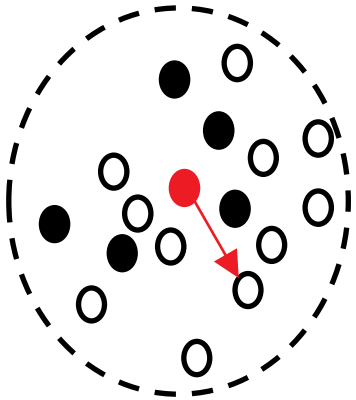
p: 抗体保持率のとき

増減率 $(1-p)\beta - q - \gamma < 0$ ⇨ $p_c = 1 - \dfrac{q+\gamma}{\beta}$

p_c~80% $(\beta = 0.5\ \gamma = 0.1\ q = 0)$

パーコレーション理論による集団免疫

小田垣「つながりの物理学」p. 86



感染者

未免疫者

免疫者

n ： 感染者が感染力を持つ間に接触する人の延べ数の平均値

n_i: その中の免疫を持つ人の数

β ： 1回の接触での感染確率

感染が広がらない条件

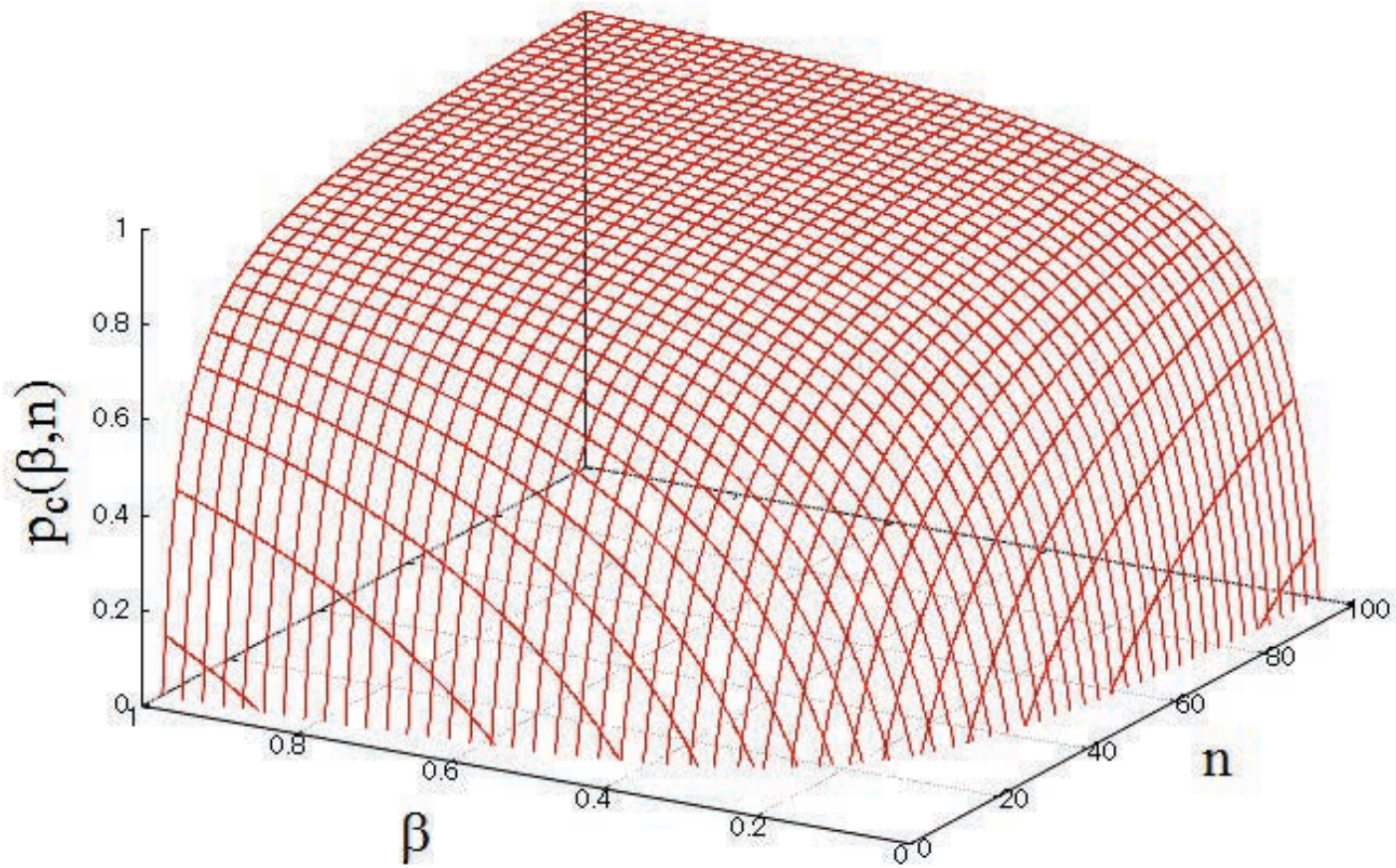
感染させる人数 ＜ 4.5 （臨界浸透ボンド数）

$$\beta(n - n_i) < 4.5$$

集団免疫率の閾値

$$p_c = \left(\frac{n_i}{n}\right)_c = 1 - \frac{4.5}{\beta n}$$

集団免疫率の閾値



n = 50 人なら

$\beta = 0.5$ のとき $p_c = 82\%$

$\beta = 0.2$ のとき $p_c = 55\%$

日本は何故収束しないか

- 日本の対策は、ＳＩＲモデルに基づいて立案されており、

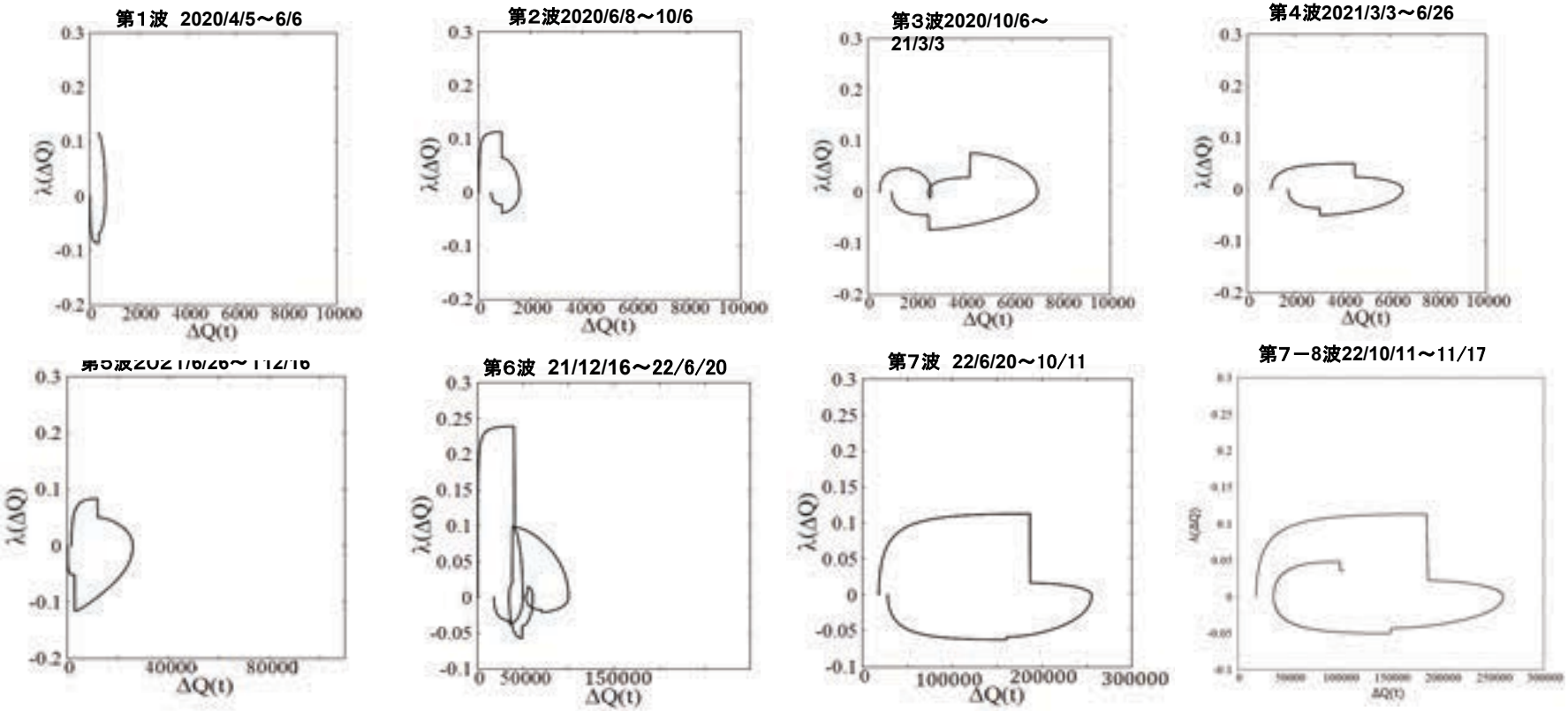
　　１．隔離の効果は限定的

　　２．感染曲線の振動は、変異株による

　　３．無症状者は、隔離する必要は無い

　などの主張のように、諸外国とは全く異なっている

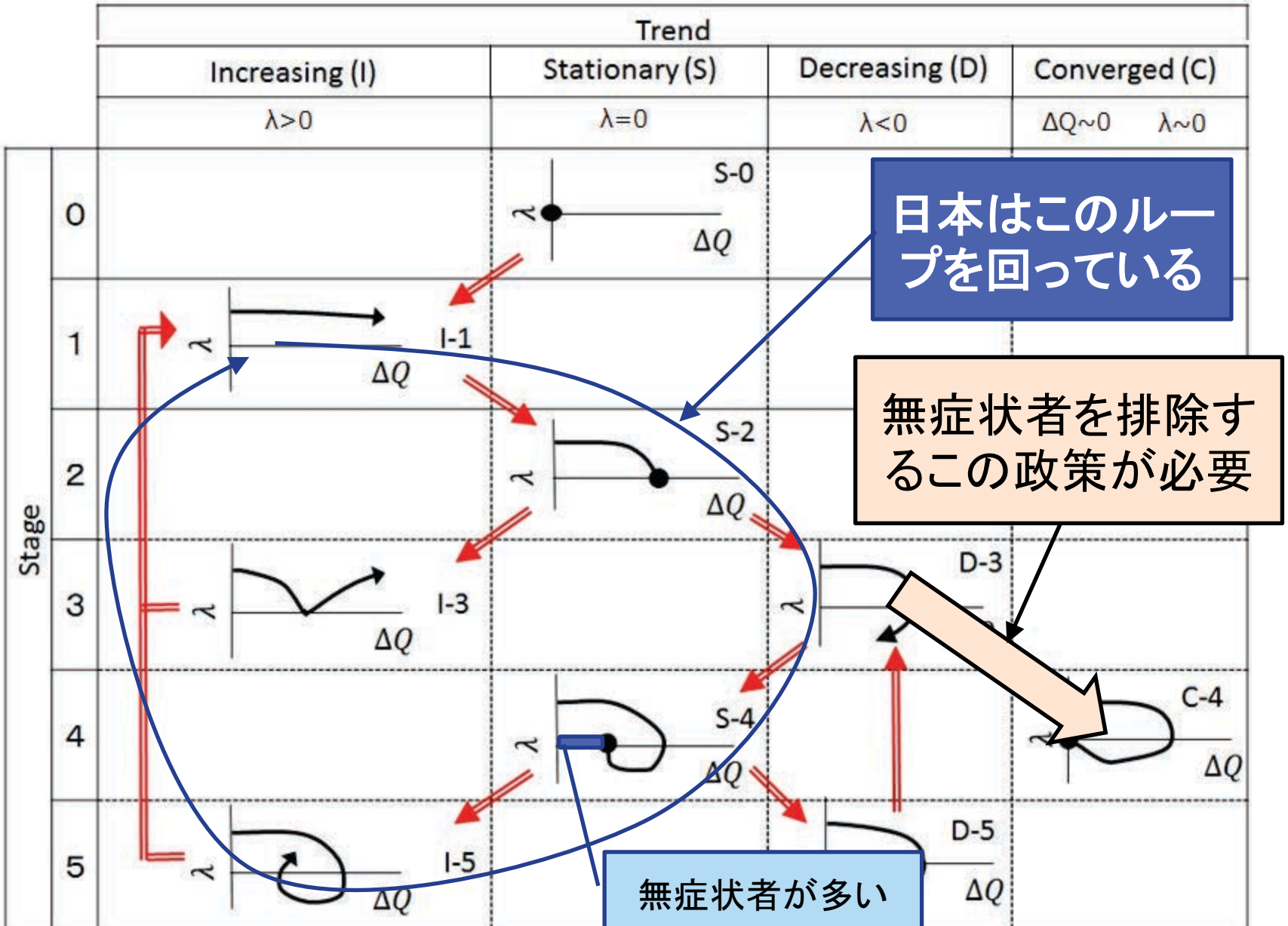
日本の感染状況図第１波～第８波



第5波以外は
波の終点での新規感染者数＞波の始点での新規感染者数

日本は何故収束しないか

T.O & R. Suda: Journal of Clinical Trials **11**, 472 (2021)



おわり

アマビエ