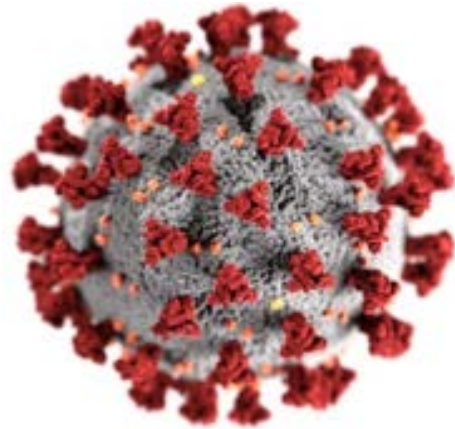


2021年6月12日
第1回松ヶ崎サイエンスフォーラム

物理学の立場から

COVID-19の特徴を理解する



SARS-CoV2



アマビエ

謝辞：世界各国のデータの解析結果を提供して頂いた須田礼二氏、
様々な意見をお寄せいただいた多くの方々に感謝いたします。

小田垣 孝

九州大学、科学教育総合研究所

今日の話

1. 人類の感染症との戦い
古来の感染症、新興感染症
スペイン風邪とSIRモデル
2. COVID-19の感染曲線と
物理としてやるべき事
3. ミニマルコンパートメントモデル
ーSIQRモデルー
4. 感染状況の分析
ワクチンなしで抑えた国
5. 波状感染曲線
6. いくつかの考察
対策の最適化
ワクチンは万能か
集団免疫について
日本は何故収束しない

物理的視点から、COVID-19を理解したい

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
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)	

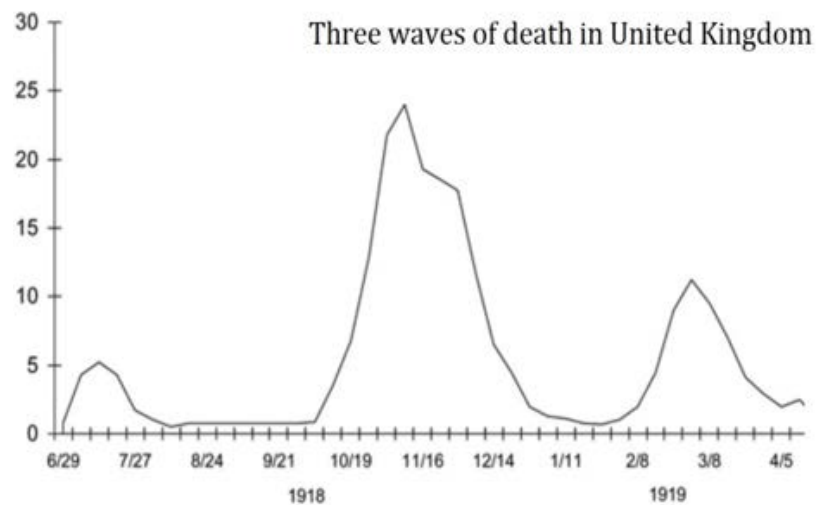
新興感染症

新興感染症	原因	初見	
プリオン病	プリオン	1920? (イ)	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)	1.72 億人報告370万人死亡

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

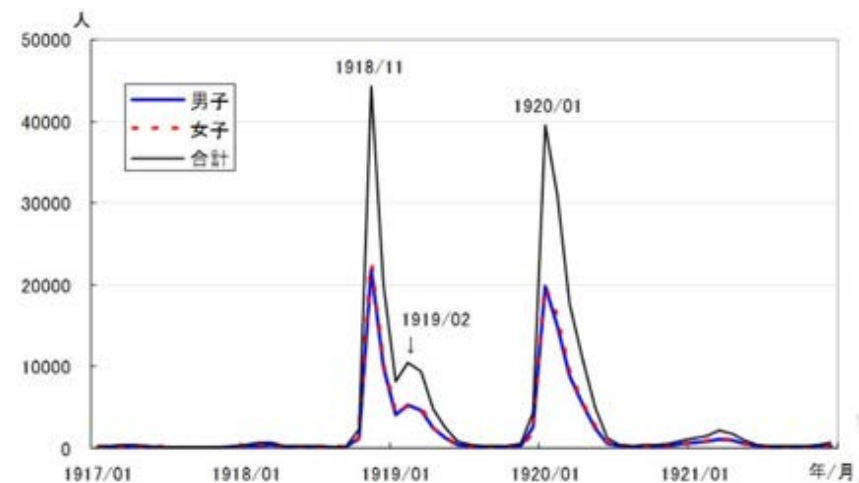


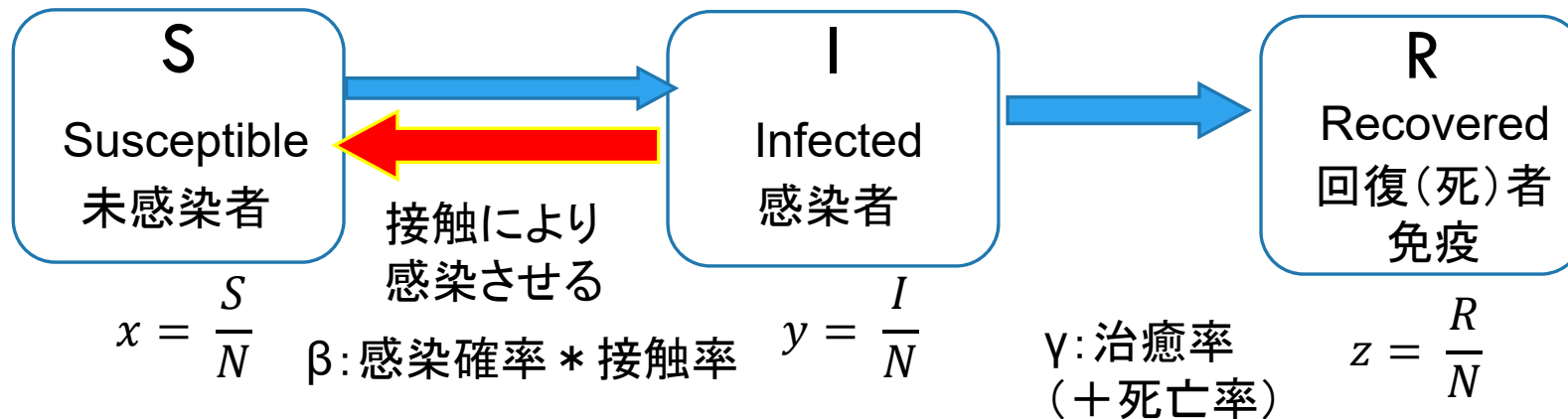
図1. インフルエンザによる死亡者数の月別推移

池田一夫, 藤谷和正, 瀧岡陽子, 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
 東京健安研年報Ann.Rep.TokyoMetr.Inst.P.H.,56, 369-374, 2005

SIR モデル

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

全人口 (N) = 未感染者 (S) + 感染者 (I) + 回復(死)者 (R) (コンパートメント)



“化学反応”速度方程式

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= -\beta xy \\ \frac{dy}{dt} &= \beta xy - \gamma y\end{aligned}$$

x, y 面上の軌跡

$$\frac{dy}{dx} = -1 + \frac{\gamma}{\beta}x$$

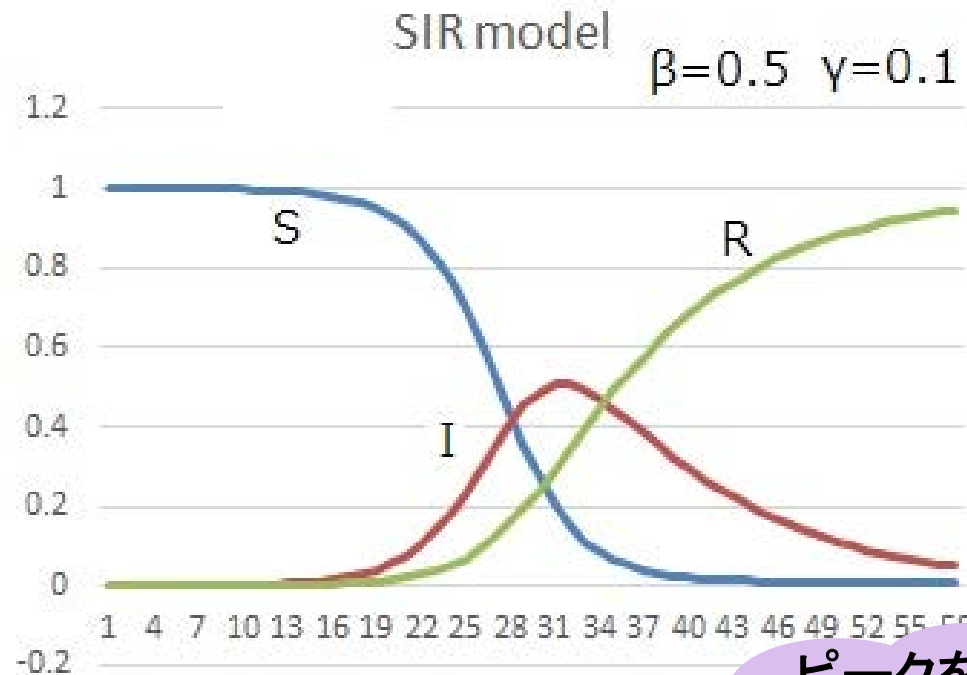
感染者の増える数 = 新規感染者 - 治った人の数

$$\frac{dz}{dt} = \gamma y$$

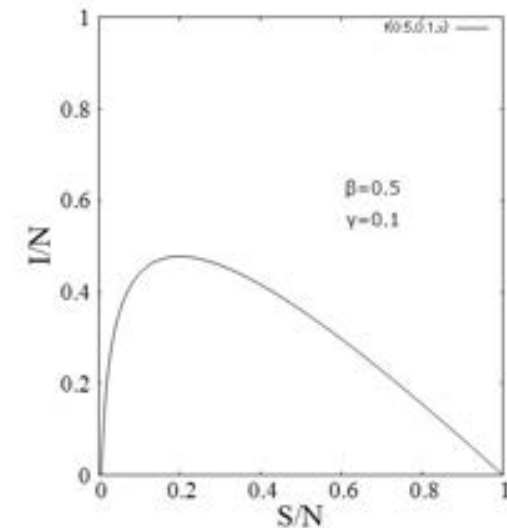
厳密解: T. Harko, F. S. N. Francisco and M. K. Mak,
Appl. Math. Comp. {¥bf 236}, 184-194 (2014)

SIR モデルによる感染曲線など

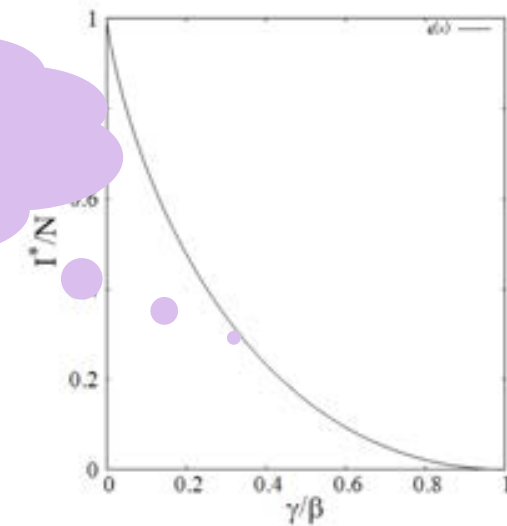
感染曲線



S-I 曲線



ピークは γ/β で決まる



よくある説明

$$\rightarrow \frac{dy}{d(\gamma t)} = \left[\frac{\beta x}{\gamma} - 1 \right] y \equiv (R - 1)y$$

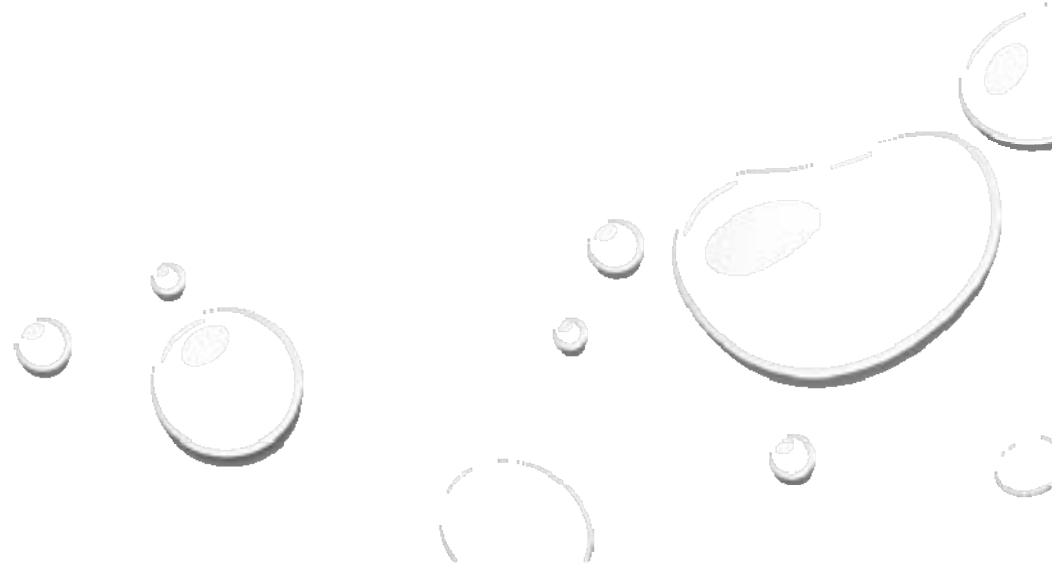
R:実効再生産数

時間の単位は治癒時間

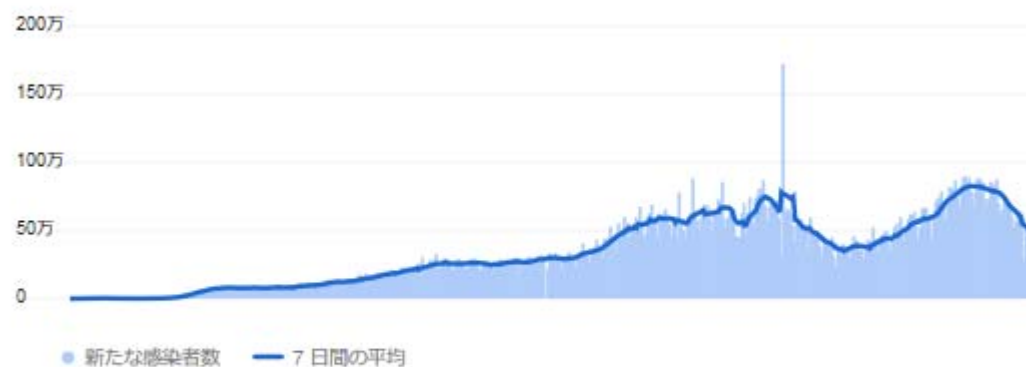
ピークを抑えるには、 γ を大きく、 β を小さく



2. COVID-19の感染曲線と 物理としてやるべき事



世界の新規感染者数



感染者数

1.72億

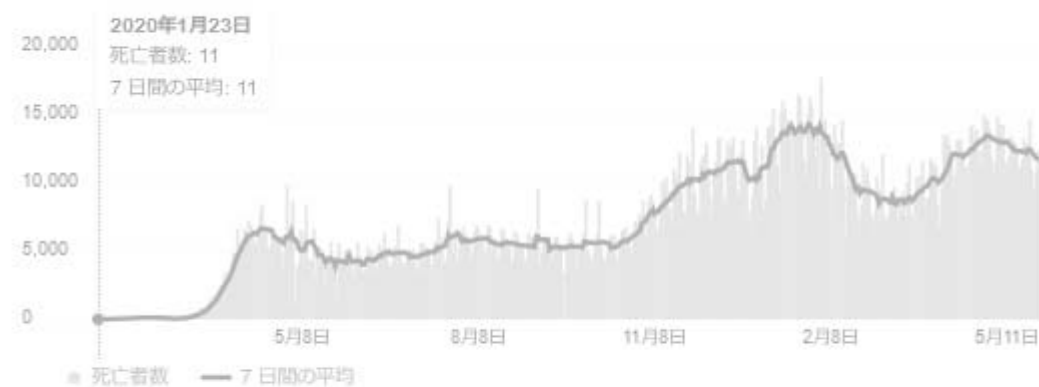
回復者数

-

死亡者数

370万

世界の死亡者数



感染者数

1.72億

回復者数

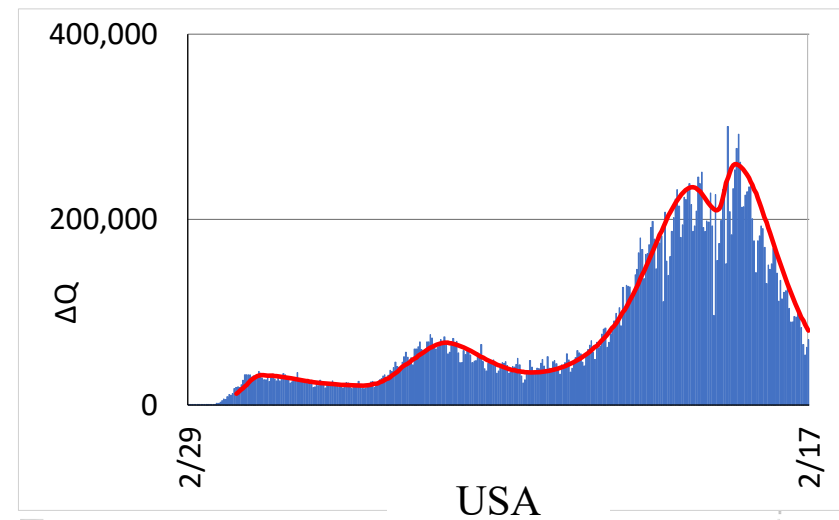
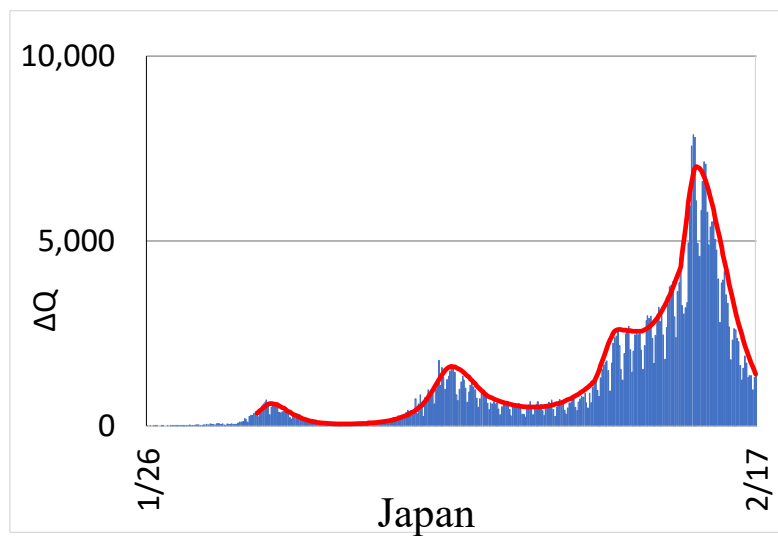
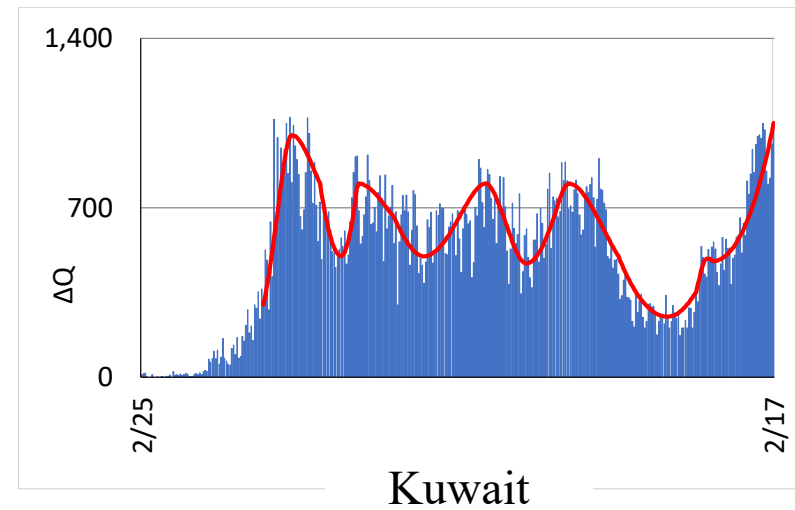
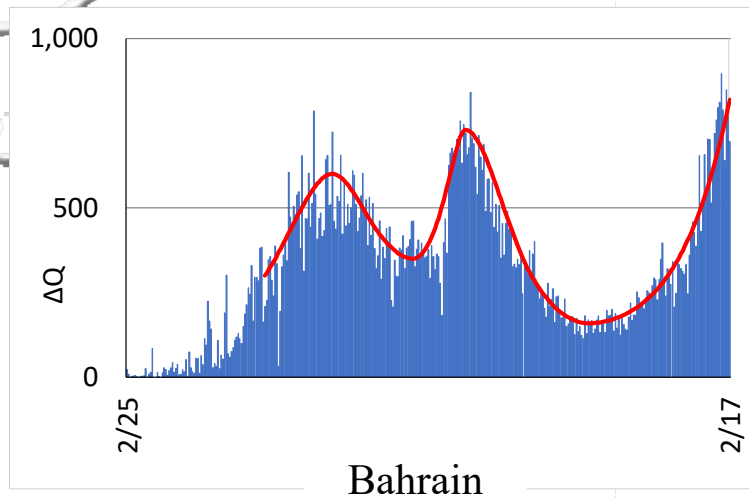
-

死亡者数

370万

From Wikipedia

波打つ感染曲線



考慮すべきCOVID-19の性質

- 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
- PCR検査により感染者を特定できる
- 感染曲線は何故波打つか？変異株か？

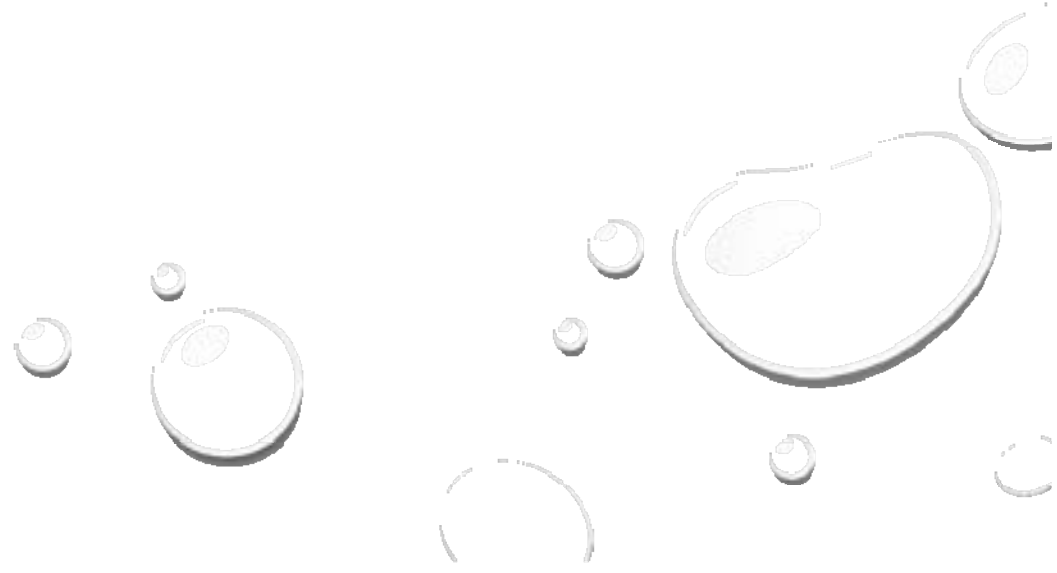
物理的に現象を理解するためには

- 適切なコンパートメント(プレイヤー)は？
- 基本的なダイナミックスは？
- 説明すべき普遍的性質は？
- 感染状況(相)の分類
- 何が予言できるか
 - ・最適な対策を決める枠組み

平均的に物事を見て、最も簡単なモデルを考える



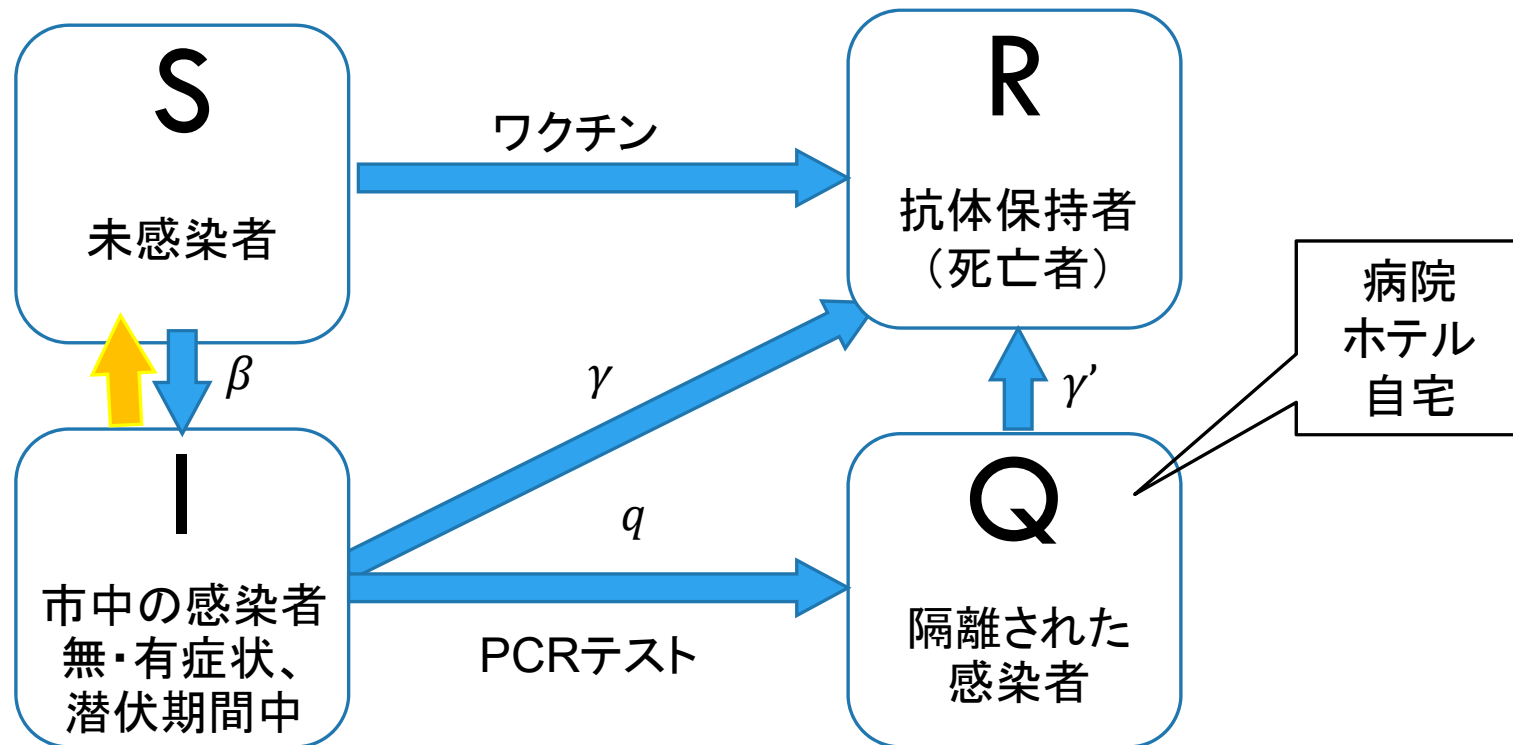
3. ミニマルコンパートメントモデル —SIQRモデル—



SIQR モデル

T.O: 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

“化学反応”速度方程式

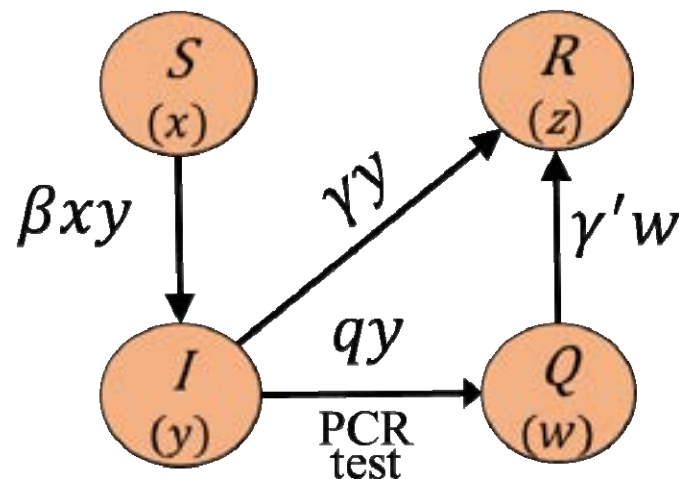
$$x = \frac{S}{N}, \quad y = \frac{I}{N}, \quad w = \frac{Q}{N}, \quad z = \frac{R}{N} \quad (N: \text{全人口})$$

$$\frac{dx}{dt} = -\beta xy$$

$$\frac{dy}{dt} = \beta xy - qy - \gamma y$$

$$\frac{dw}{dt} = qy - \gamma' w$$

$$\frac{dz}{dt} = \gamma y + \gamma' w$$



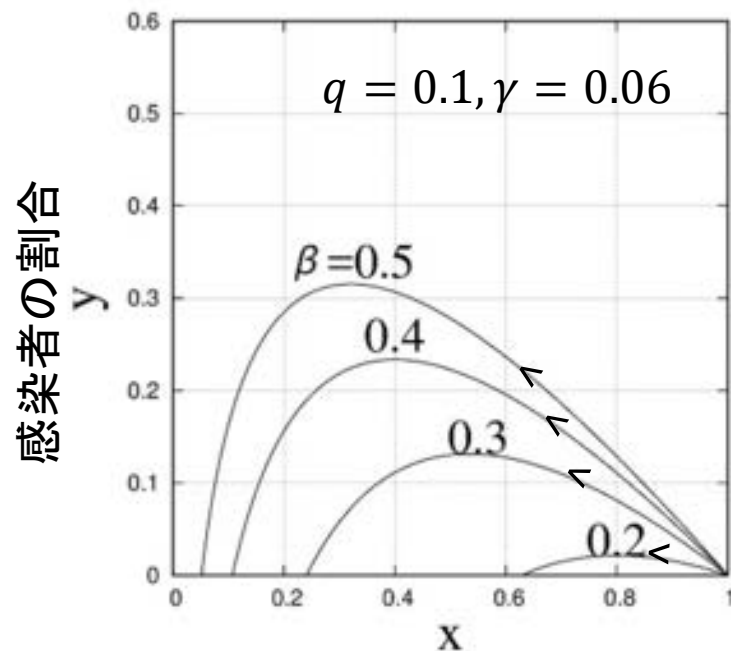
- ◆ β, q 政策依存
- ◆ γ 変えられない
- ◆ ワクチン効果は β に含める
- ◆ 時間の単位は1日
- ◆ 日毎新規感染者数 qyN
- ◆ 記憶効果は、係数に含める

基本的性質

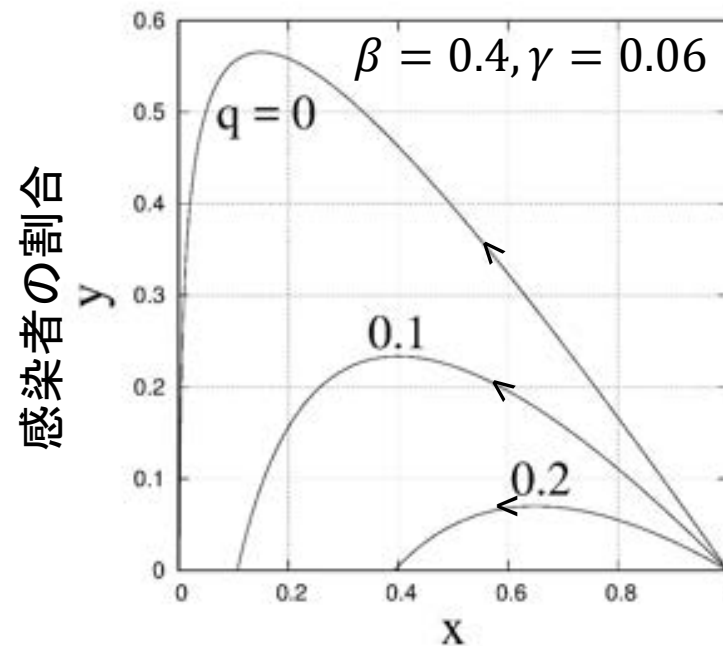
1. (x, y) 面上の軌跡

$$\frac{dy}{dx} = -1 + \frac{q + \gamma}{\beta x} \Rightarrow y = 1 - x + \frac{q + \gamma}{\beta} \ln x$$

初期条件: $x = 1, y = 0$



未感染者の割合

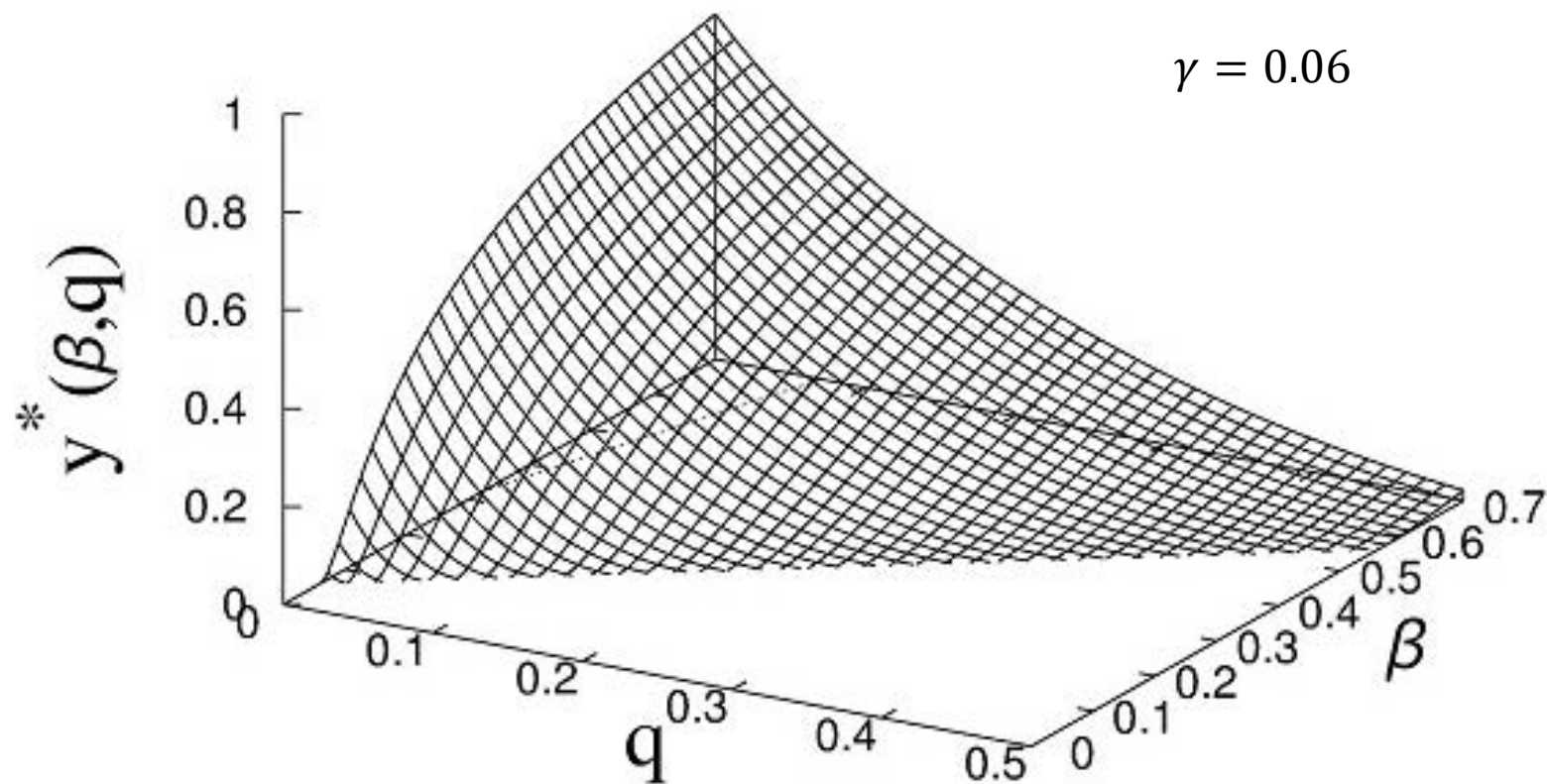


未感染者の割合

基本的性質

2. ピークの位置・高さ

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

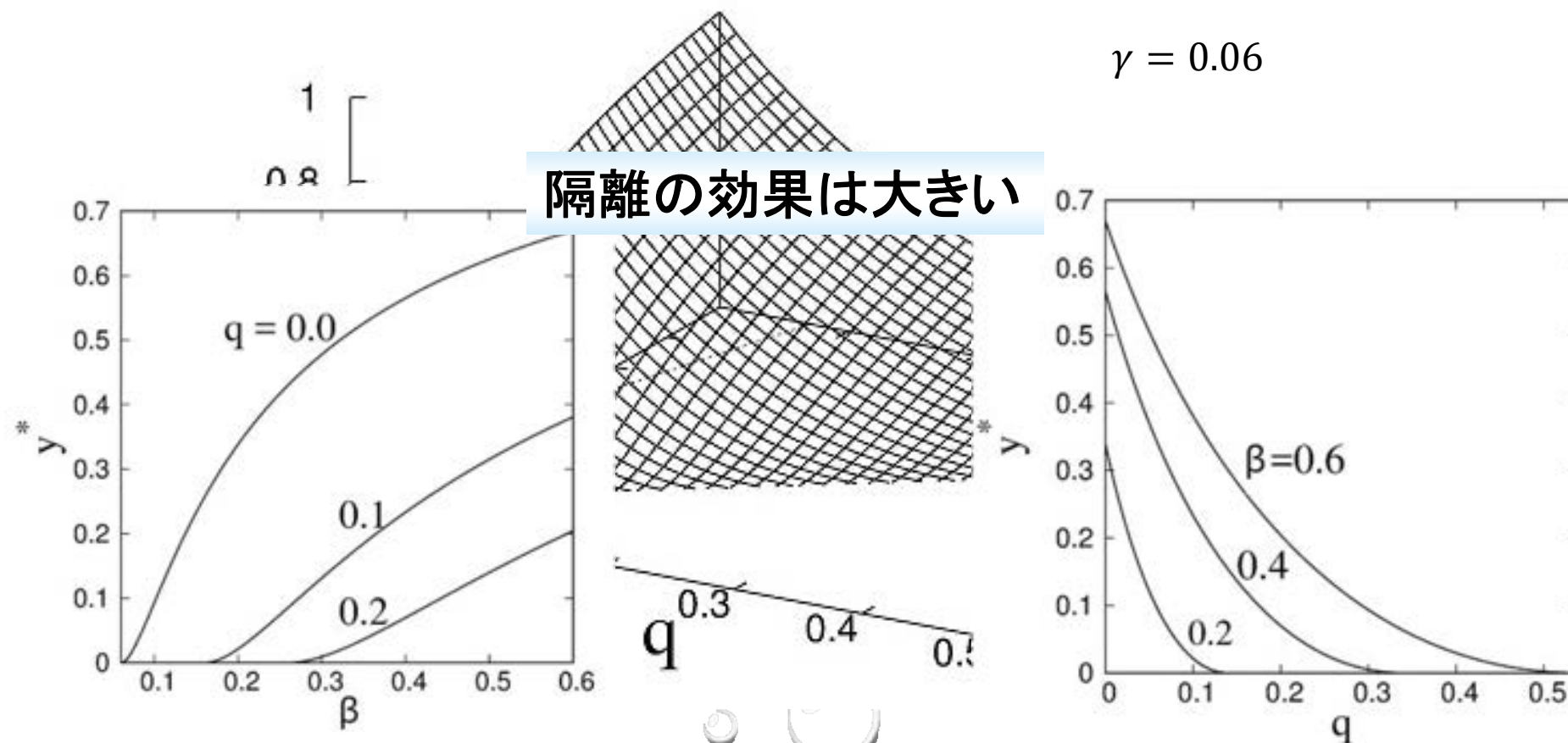


基本的性質

2. ピークの位置・高さ

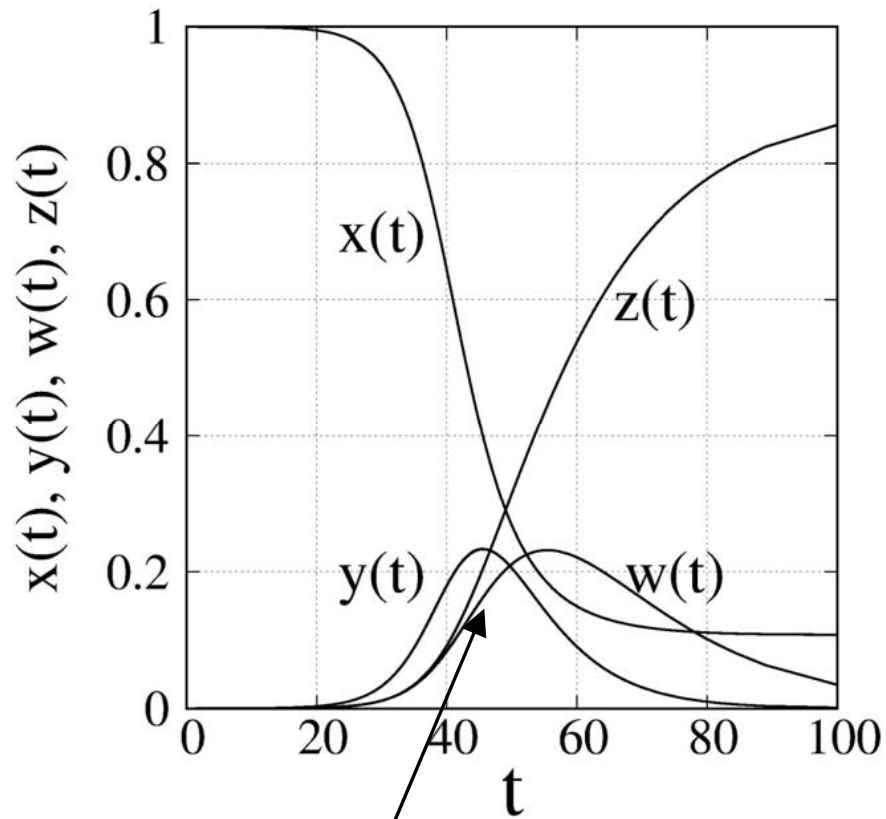
$$x^* = \frac{q + \gamma}{\beta}, \quad y^* = 1 - \frac{q + \gamma}{\beta} + \frac{q + \gamma}{\beta} \ln \frac{q + \gamma}{\beta}$$

$$\gamma = 0.06$$

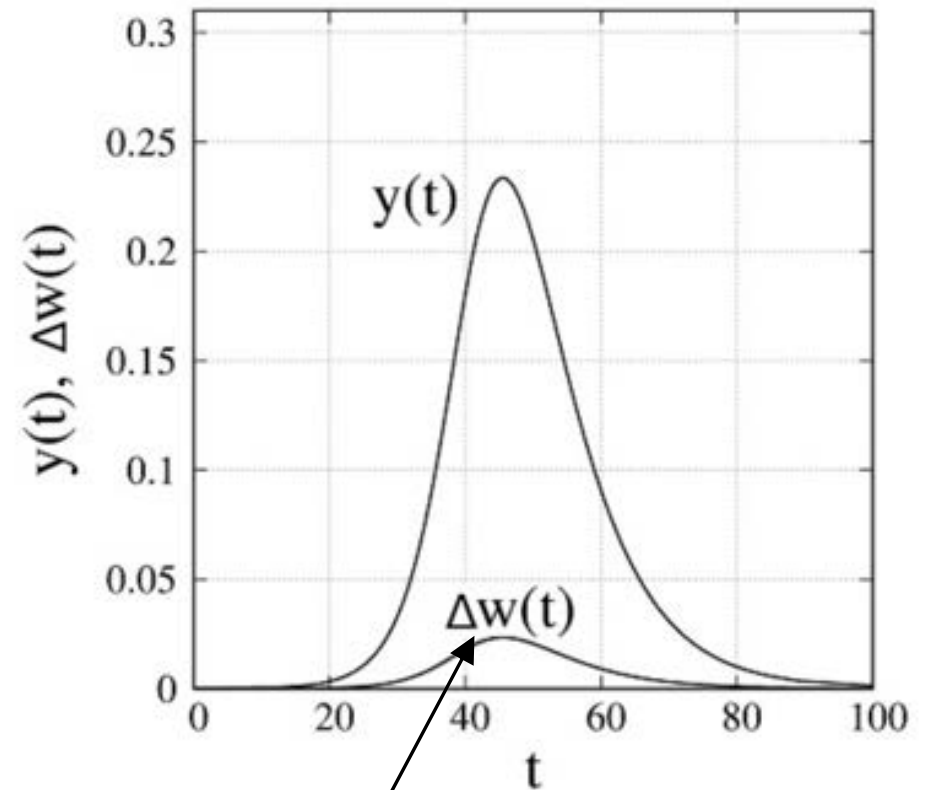


厳密解の特徴

$$\beta = 0.4, q = 0.1, \gamma = \gamma' = 0.06$$



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



4. 感染状況の分析



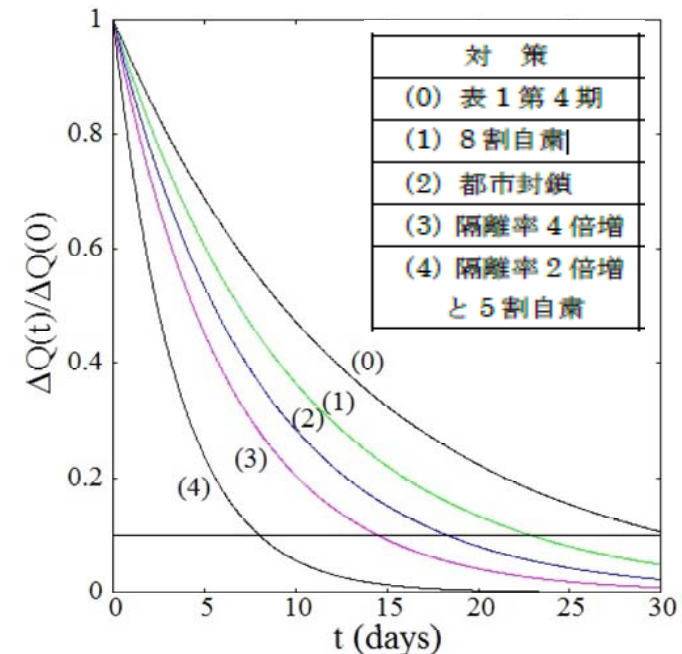
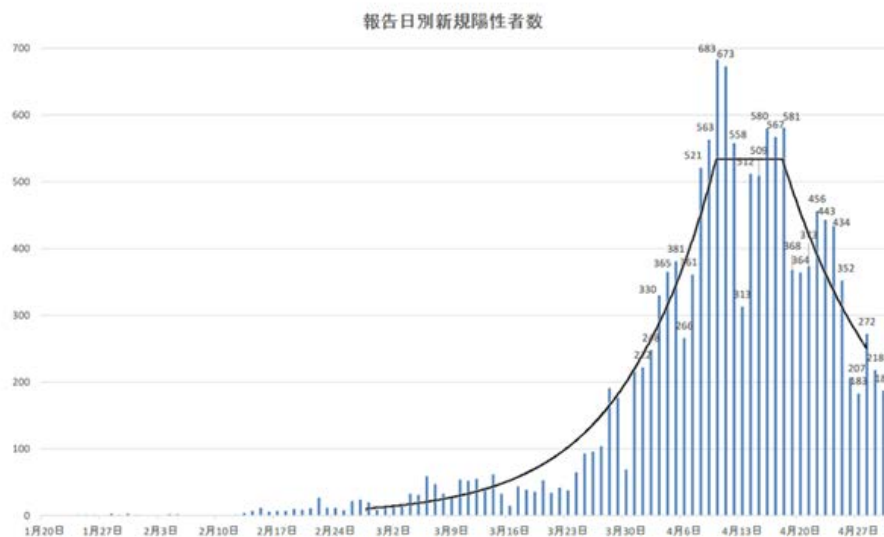
1. アウトブレイク初期の分析

$$\frac{dy}{dt} = \beta xy - qy - \gamma y \quad \xrightarrow{x \cong 1} \quad \frac{dy}{dt} = (\beta - q - \gamma)y$$

$$y(t) = y(0) \exp(\beta - q - \gamma) t$$

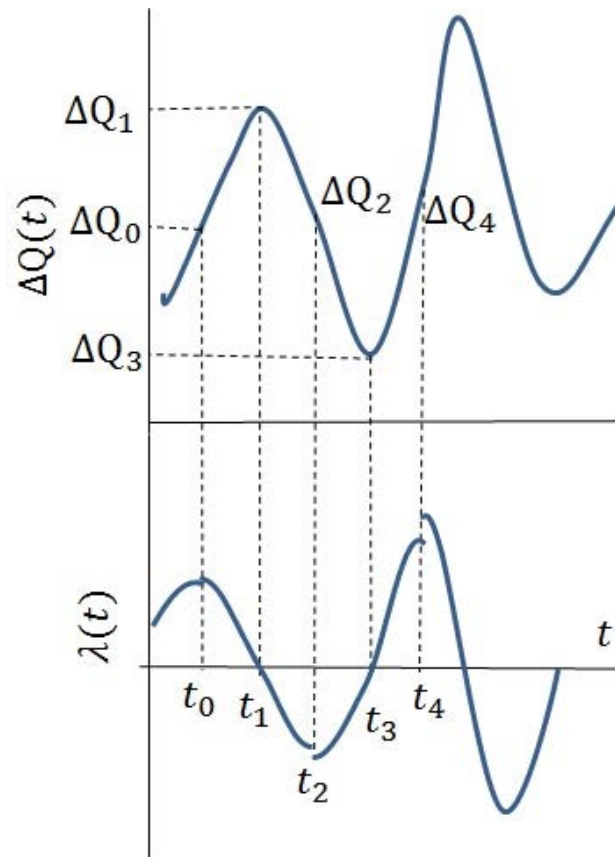
区分指数関数で近似できる

新型コロナウイルス感染症の国内発生動向

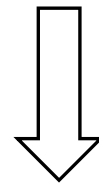


2. 感染状況の分類

感染曲線(日ごと陽性者数)



ΔQ の変曲点—極値—
変曲点で区間に分ける



増減率

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

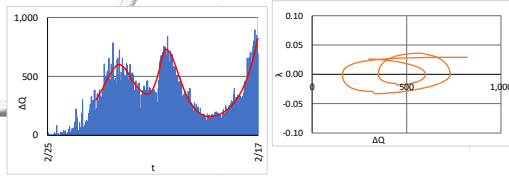
を各区間で2次関数で近似

ΔQ の連続性を要請
各区間で exp(3次関数)



(a)Trend I : Stage 1

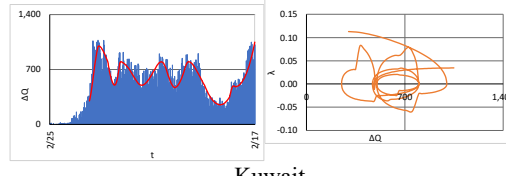
(a1) I-1₃



Bahrain

(b)Trend I : Stage 3

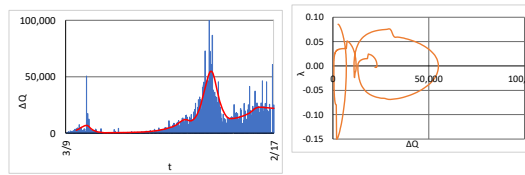
(b1) I-3₅



Kuwait

(c)Trend S : Stage 2

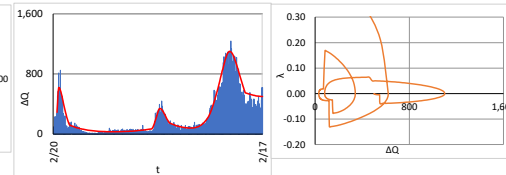
(c1) S-2₃



France

(d)Trend S : Stage 4

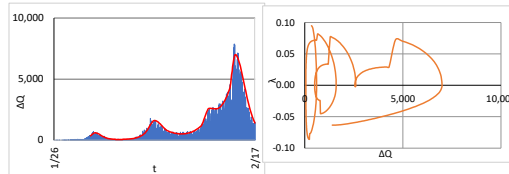
(d1) S-4₃



South Korea

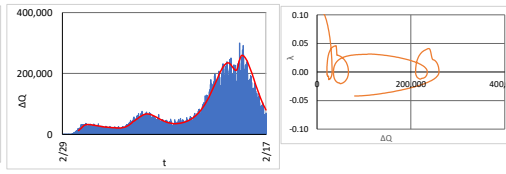
(e)Trend D : Stage 3

(e1) D-3₃



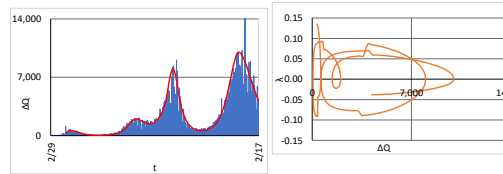
Japan

(e2) D-3₃



USA

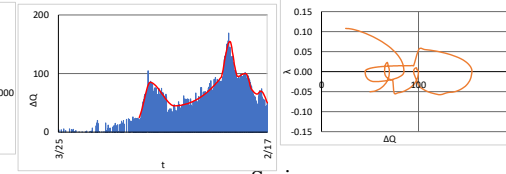
(e2) D-3₃



Israel

(f)Trend D : Stage 5

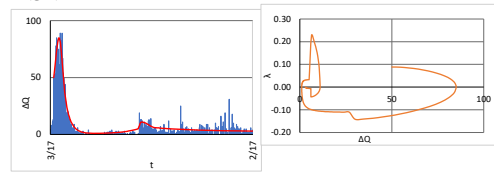
(f1) D-5₂



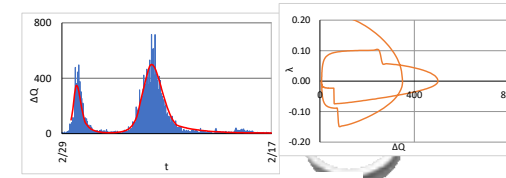
Syria

(g)Trend C : Stage 4

(g1) C-4₂



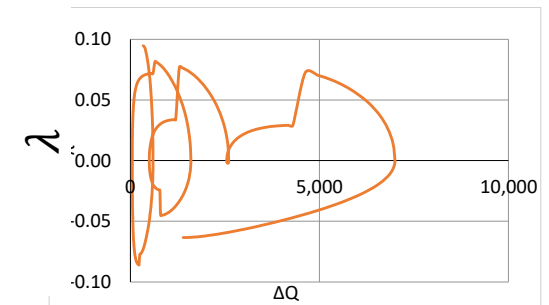
New Zealand



Australia

感染状況図

増減率を感染者数の
関数として表す

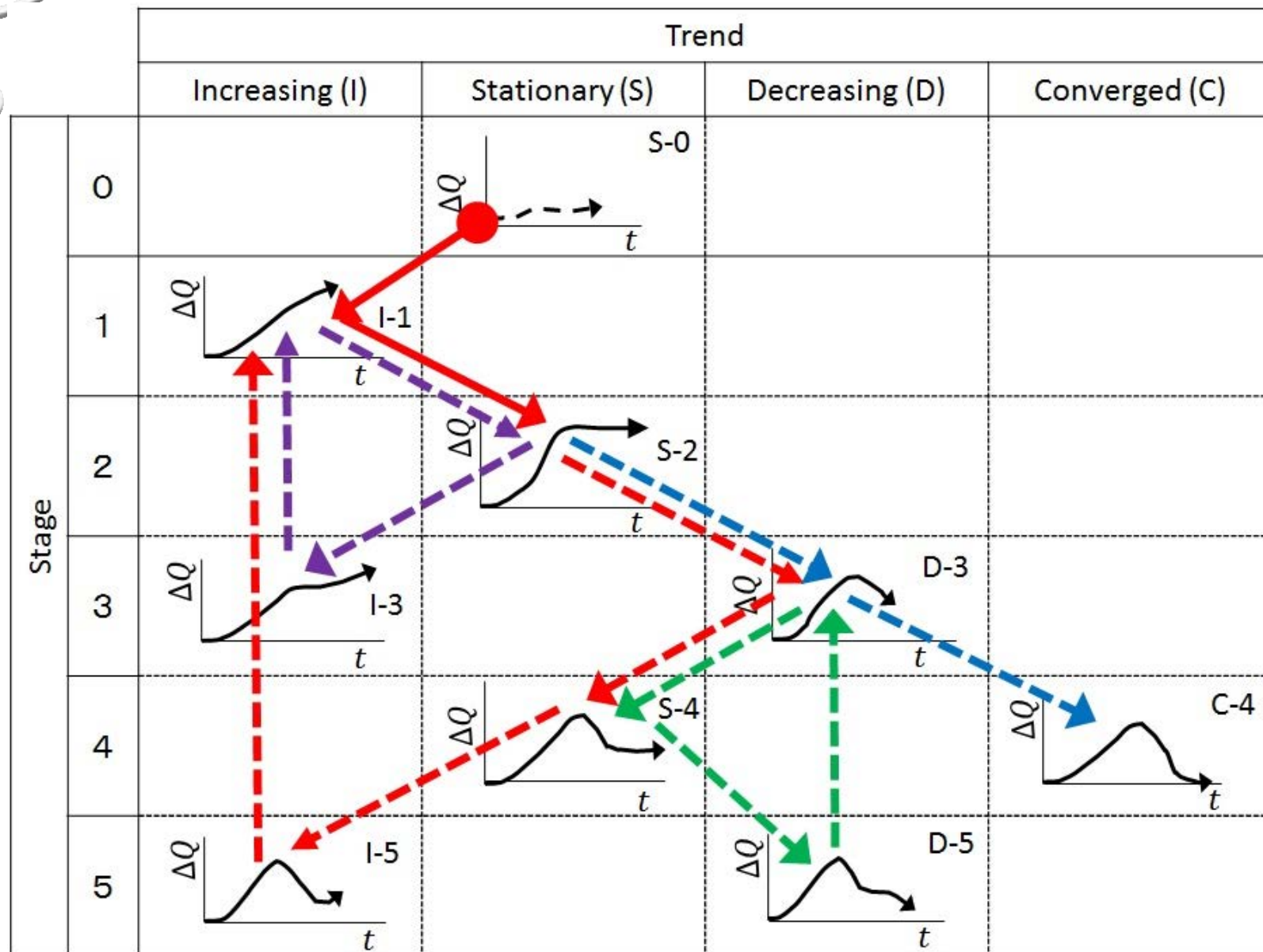


ΔQ

感染状況の分類 $T - S_n$

		Trend			
		Increasing (I)	Stationary (S)	Decreasing (D)	Converged (C)
		$\lambda > 0$	$\lambda = 0$	$\lambda < 0$	$\Delta Q \sim 0$ $\lambda \sim 0$
Stage	0				
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				

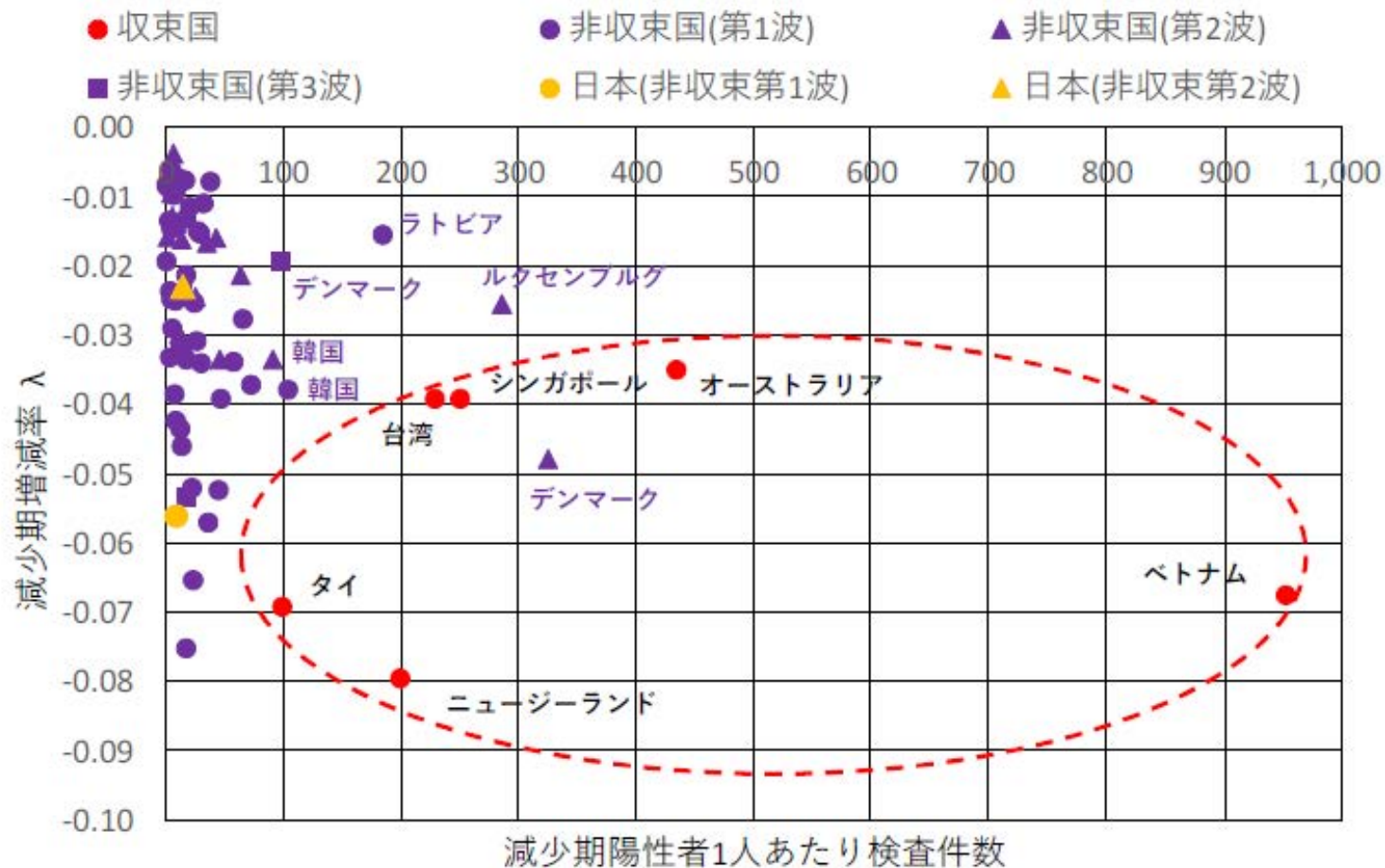
日毎新規陽性者数 $T - S_n$



190力国の分類2021年2月17日

T	S	Countries		
		Wave 1	Wave 2	Wave 3 ~
I	1	Antigua and Barbuda, Saint Lucia	Benin, Gabon, Gambia, Guinea-Bissau, Sao Tome and Principe, South Sudan	Bahrain, Jamaica, Somalia
	3	Barbados, Seychelles	Mongolia, Sri Lanka	Kuwait, Maldives, Montenegro
	5	Ethiopia, Greece, Hungary, Iraq, Jordan, Moldova, Qatar	Bulgaria, Burundi, Czechia, Egypt, Estonia, Namibia, West Bank and Gaza	Iran, Paraguay, Peru
S	0	Cambodia, Dominica, Fiji, Grenada, Laos, Marshall Islands, Micronesia, Saint Kitts and Nevis, Samoa, Solomon Islands, Timor-Leste, Vanuatu		
	2	Botswana, Saint Vincent and the Grenadines	Brazil, Chile, Cote d'Ivoire, Cuba, Ecuador, Mozambique, San Marino, Senegal	Finland, France, Malta, Togo
	4	Bahamas, Belize, Bhutan, Bosnia and Herzegovina, Cameroon, Congo (Brazzaville), Croatia, Cyprus, Georgia, Guatemala, Guinea, Iceland, India, Lithuania, Madagascar, Morocco, Nepal, Nicaragua, Papua New Guinea, Philippines, Poland, Romania, Trinidad and Tobago, Ukraine, Uruguay	Afghanistan, Armenia, Austria, Azerbaijan, Bangladesh, Belgium, Burma, Denmark, Italy, Kenya, Kosovo, Kyrgyzstan, Lebanon, Liberia, Mali, Mauritania, Mauritius, Niger, North Macedonia, Oman, Pakistan, Saudi Arabia, Slovakia, Turkey, Uganda, Uzbekistan, Venezuela	Algeria, Chad, Ireland, Luxembourg, Netherlands, Norway, Serbia, South Korea, Sweden, United Arab Emirates
D	3	Costa Rica, Indonesia, Malaysia, Slovenia	Albania, Argentina, Belarus, Bolivia, Cabo Verde, Canada, Colombia, Comoros, Congo (Kinshasa), Dominican Republic, El Salvador, Eswatini, Germany, Ghana, Guyana, Haiti, Kazakhstan, Lesotho, Libya, Malawi, Mexico, Nigeria, Panama, Russia, Rwanda, Sierra Leone, South Africa, Sudan, Suriname, Switzerland, Thailand, Tunisia, Zambia, Zimbabwe	Andorra, Honduras, Israel, Japan, Monaco, Portugal, Spain, United Kingdom, USA, Vietnam
	5	Angola, Eritrea, Latvia, Tajikistan	Liechtenstein, Syria	Burkina Faso
	4	Brunei, Central African Republic, China, Equatorial Guinea, Holy See, Tanzania, Yemen	Australia, Djibouti, New Zealand, Singapore, Taiwan	
C				

収束国の特徴



収束国・非収束国の減少期陽性者1人
あたり検査件数と減少期増減率の分布傾向

収束している国では、検査数／感染者数が100以上

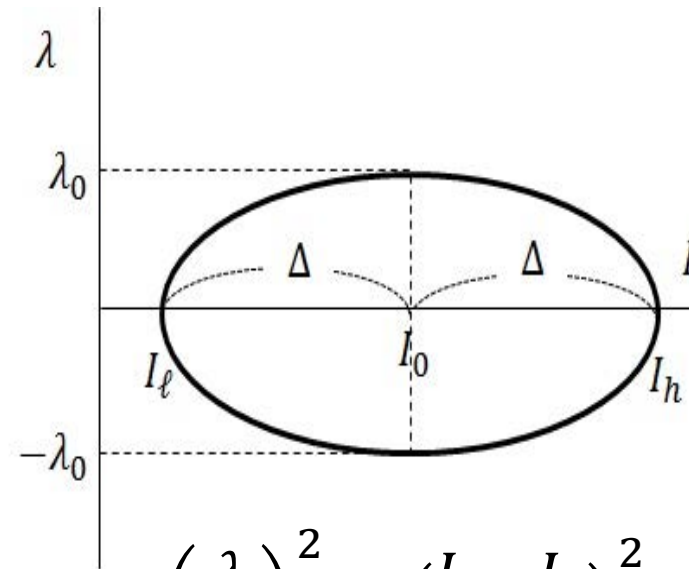
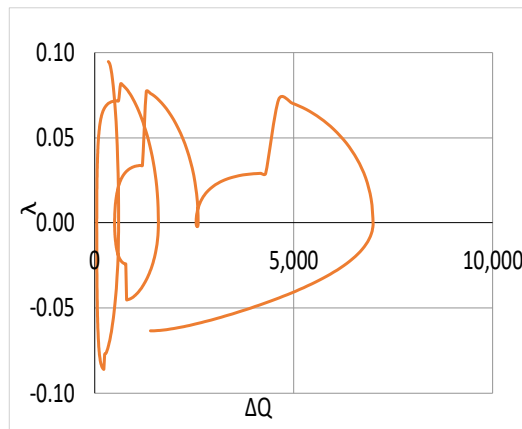
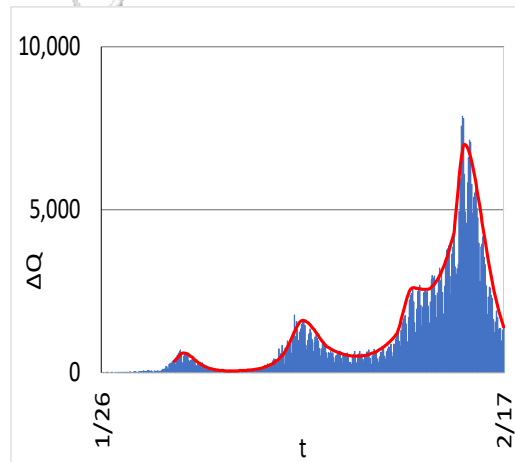


5. 感染曲線の振動の自己組織化



新規感染者数に依存する増減率

λ と $\Delta Q(I)$ 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

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

解析解

变数变换

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_0 \cos x & \tilde{t} &= \lambda_0 t \\ I - I_0 &= \Delta \sin x & a &= \Delta / I_0 \end{aligned} \quad \frac{I}{I_0} = 1 + \frac{a \tan(x/2)}{1 + \tan^2(x/2)}$$

方程式

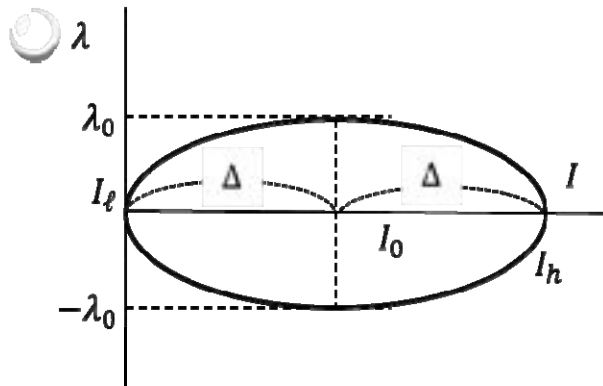
$$a \frac{dx}{d\tilde{t}} = 1 + a \sin x$$

解

$$\tilde{t} = \begin{cases} \frac{2a}{\sqrt{1-a^2}} \left[\tan^{-1} \frac{\tan(x/2) + a}{\sqrt{1-a^2}} - \tan^{-1} \frac{a}{\sqrt{1-a^2}} \right] & \text{when } a < 1 \\ \frac{2 \tan(x/2)}{1 + \tan(x/2)} & \text{when } a = 1 \\ \frac{a}{\sqrt{a^2-1}} \left[\ln \frac{\tan(x/2) + a - \sqrt{a^2-1}}{\tan(x/2) + a + \sqrt{a^2-1}} - \ln \frac{a - \sqrt{a^2-1}}{a + \sqrt{a^2-1}} \right] & \text{when } a > 1 \end{cases}$$

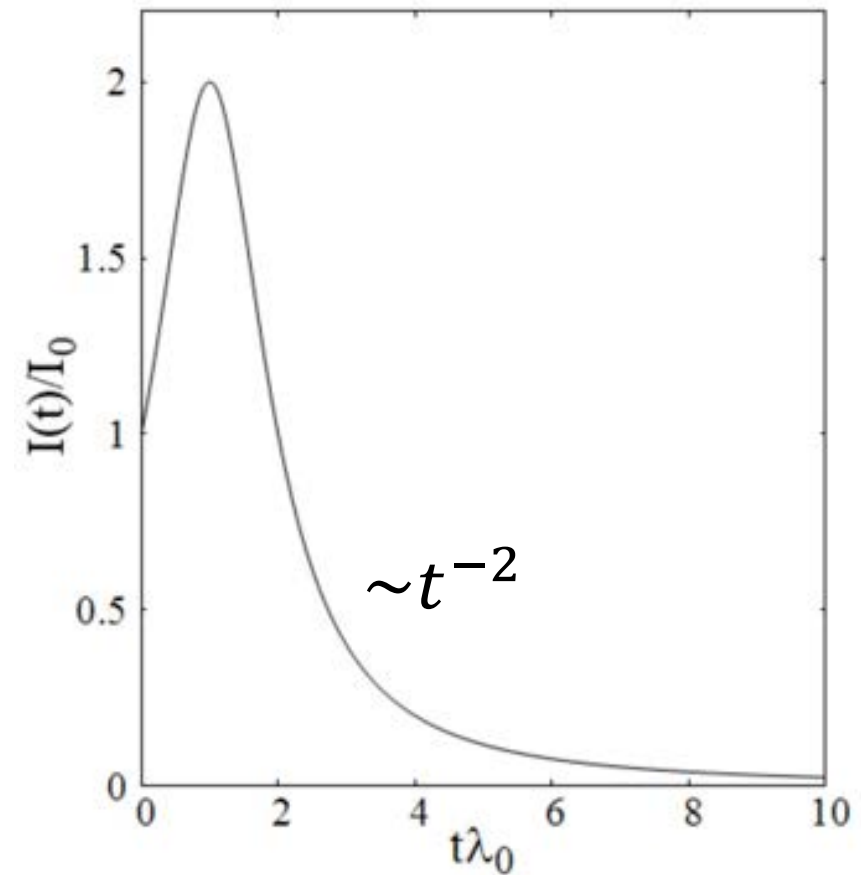
初期条件 $I(0) = I_0$

$a = 1$: 臨界的

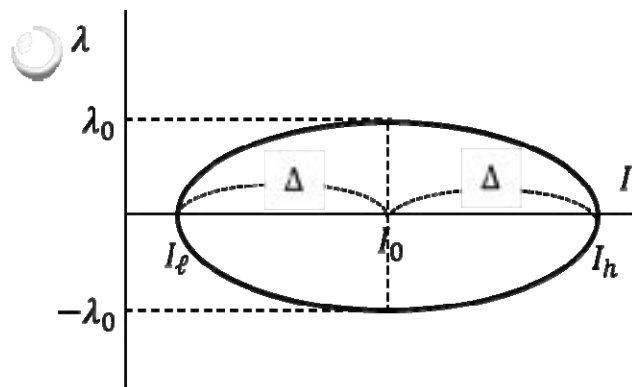


➤ $t\lambda_0 = 1$ で最大値 $I_{\max}/I_0=2$

➤ $t \rightarrow \infty$ で、 $\sim t^{-2}$ で減衰

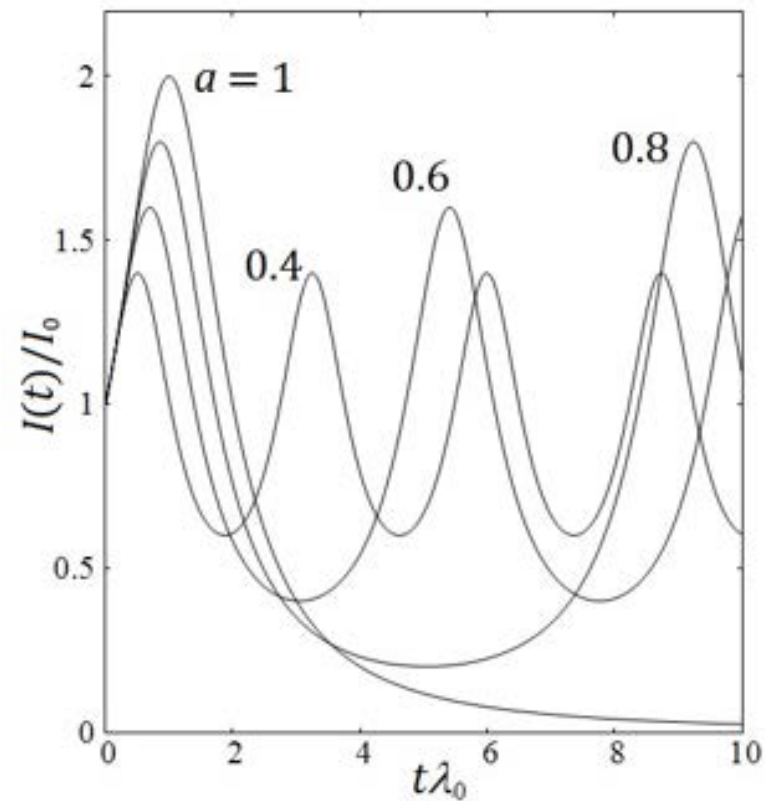


$a < 1$: 振動

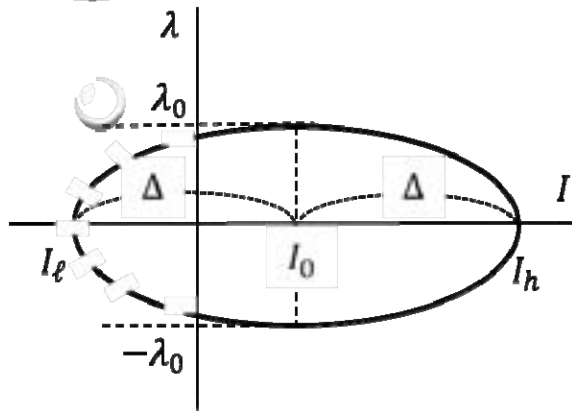


- I_h と I_ℓ の間を振動
- 周期は

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



$a > 1$: 一山で減衰

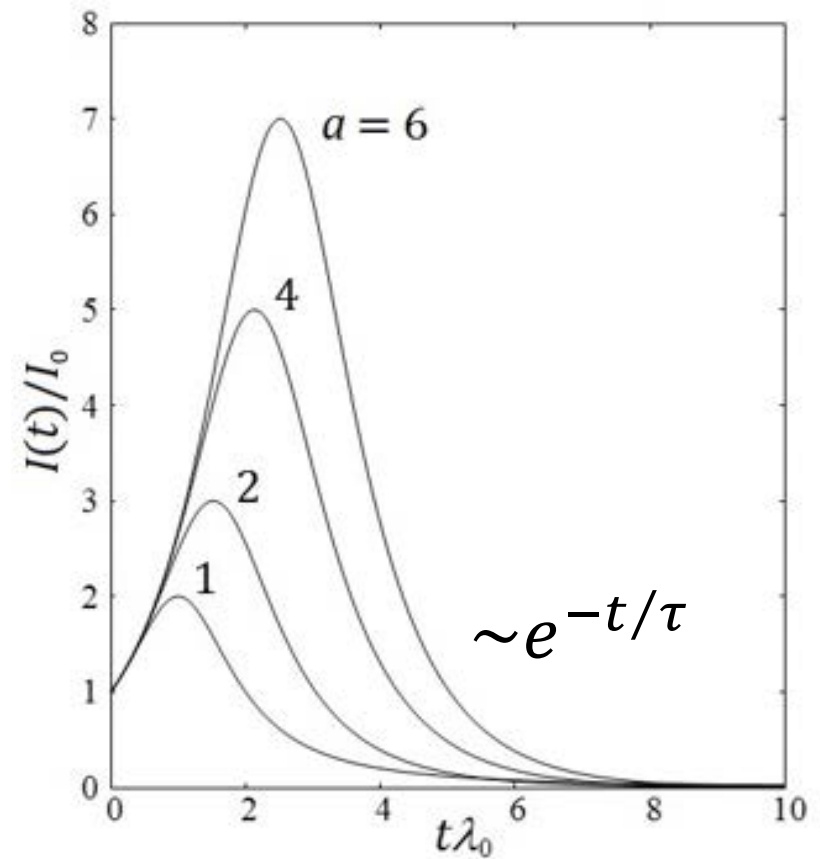


➤ $t\lambda_0 = \frac{a}{\sqrt{a^2-1}} \ln(a + \sqrt{a^2-1})$ で

最大値 $I_{\max}/I_0 = 1+a$

➤ $t \rightarrow \infty$ での減衰定数

$$\tau\lambda_0 = \frac{a}{\sqrt{a^2-1}}$$



この政策が必要！！



6. いくつかの考察

- 集団免疫
 - ワクチンは万能か
 - 最適な政策の決め方
 - まとめに代えて
- 



集团免疫



これまでの考え方

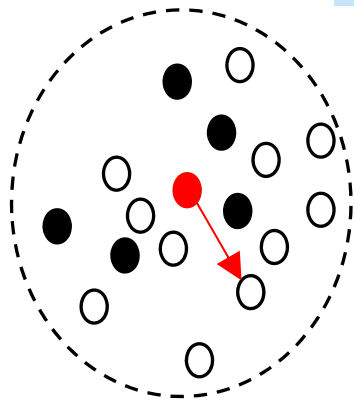
p : 抗体保持率のとき

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

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

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

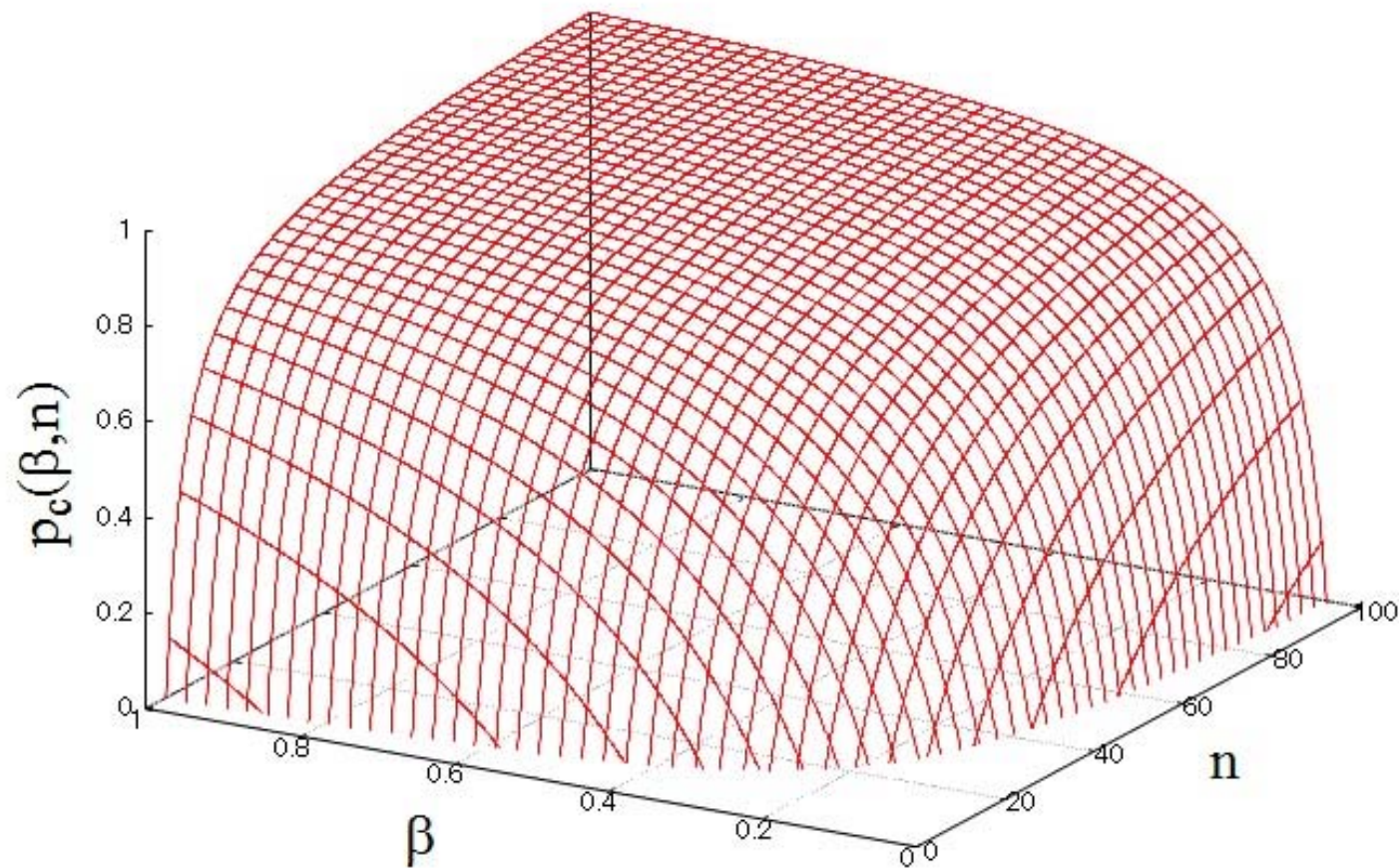
感染させる人数 < 4.5 (臨界浸透ボンド数)

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

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 $p_c = 55\%$



ワクチンは万能か



ワクチン効果の分析6月6日

須田:私信

63.0% C-4

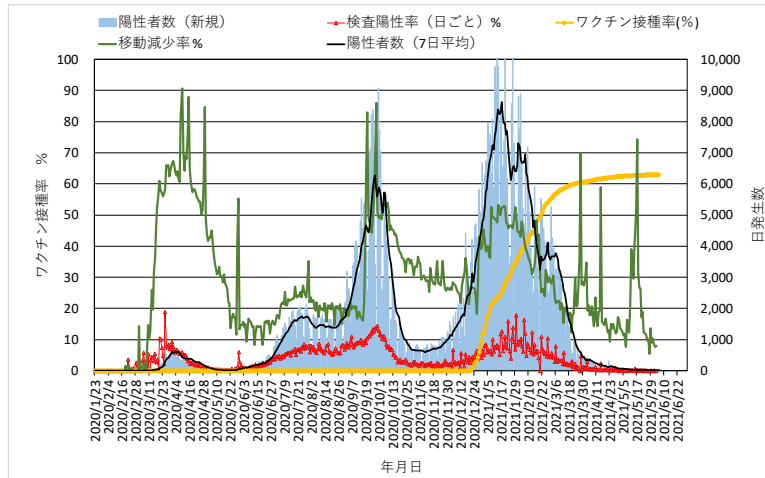


図 検査陽性者とワクチン接種率の推移 イスラエル

61.1% D-3

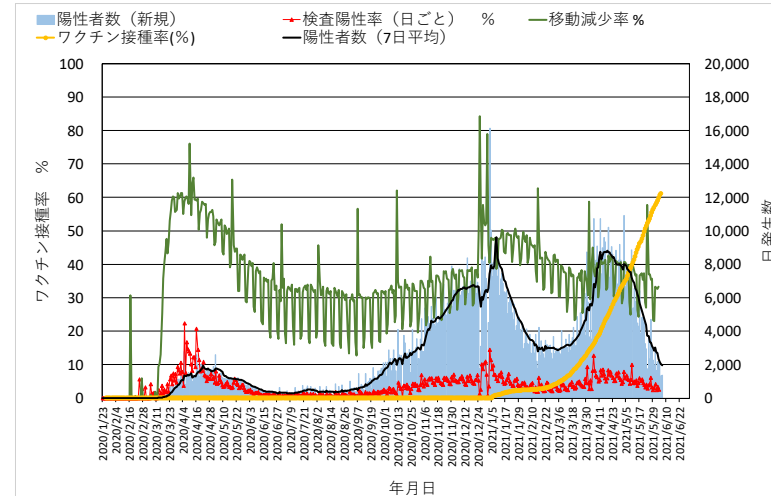


図 検査陽性者とワクチン接種率の推移 カナダ

59.1% I-4

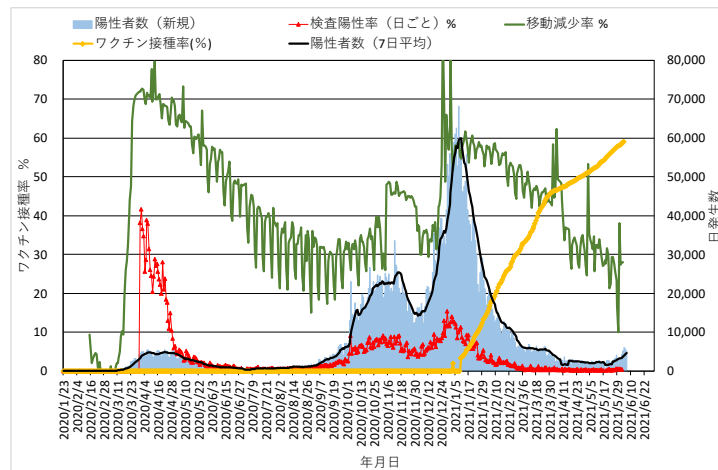


図 検査陽性者とワクチン接種率の推移 英国

58.7% D-3

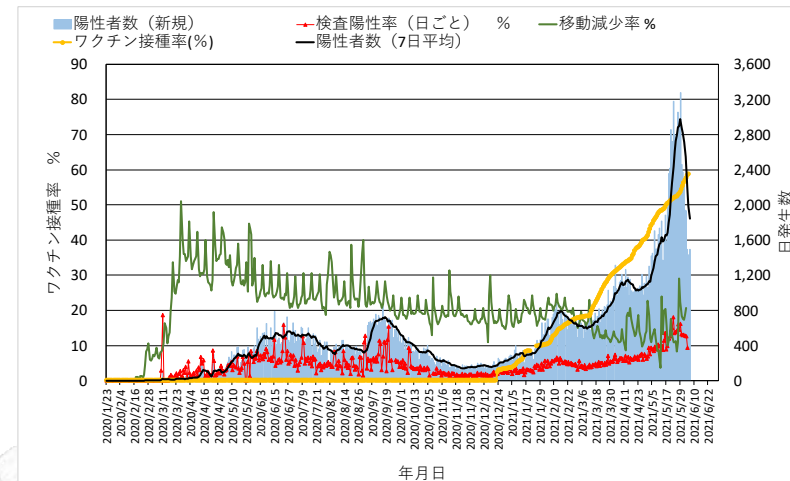


図 検査陽性者とワクチン接種率の推移 パーレーン

58.3% I-4

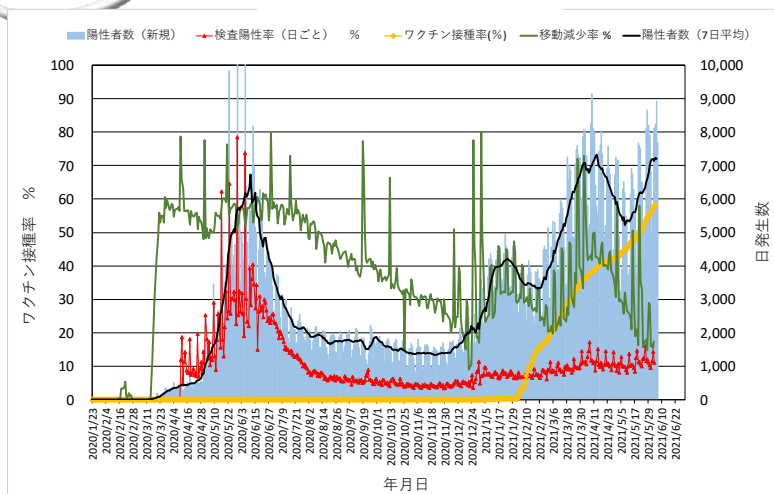


図 検査陽性者とワクチン接種率の推移 チリ

57.6% D-3

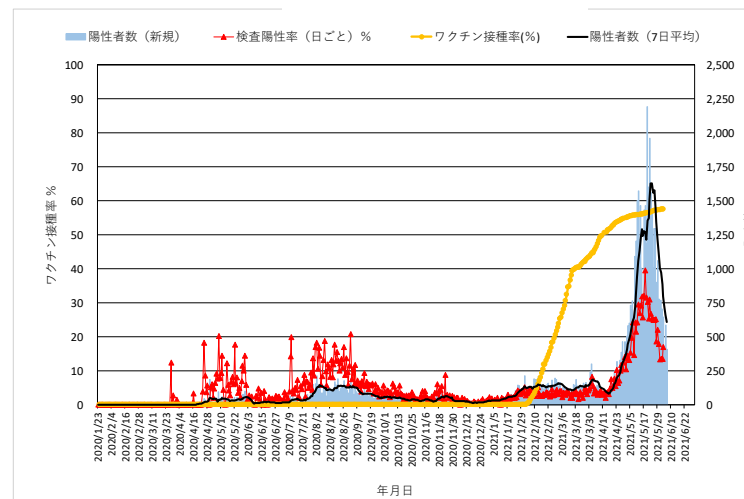


図 検査陽性者とワクチン接種率の推移 モルディブ

56.0% I-3

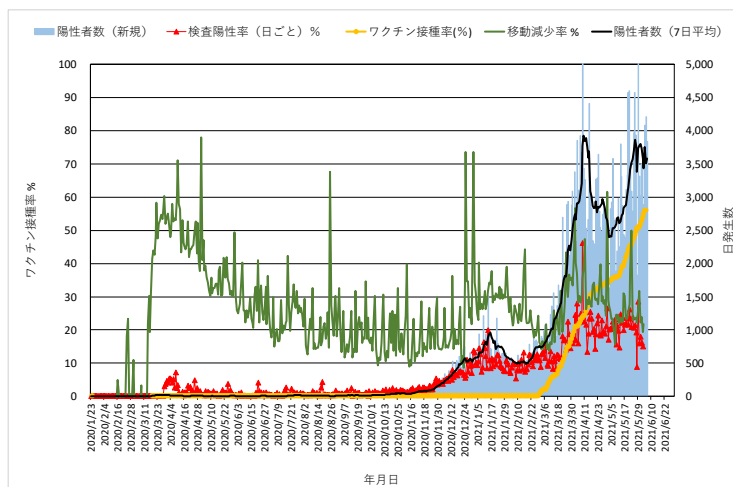


図 陽性者数とワクチン接種率の推移 (ウルグアイ)

50.9% D-5

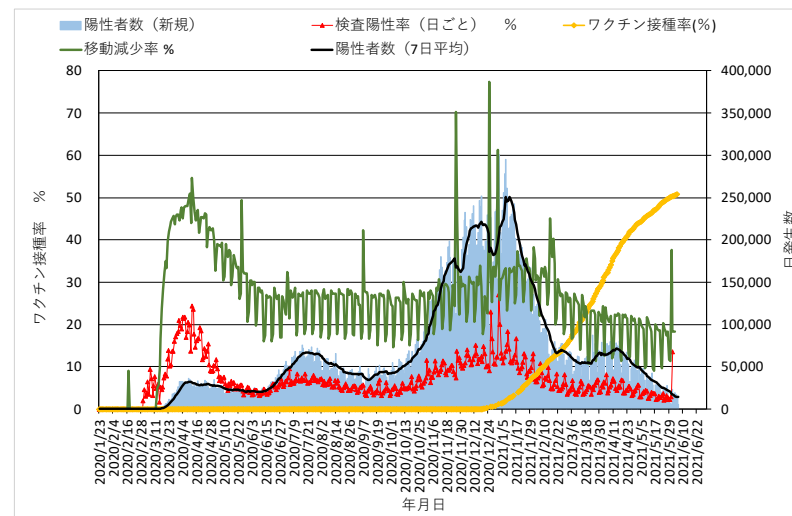


図 検査陽性者とワクチン接種率の推移 米国

45.1% D-3

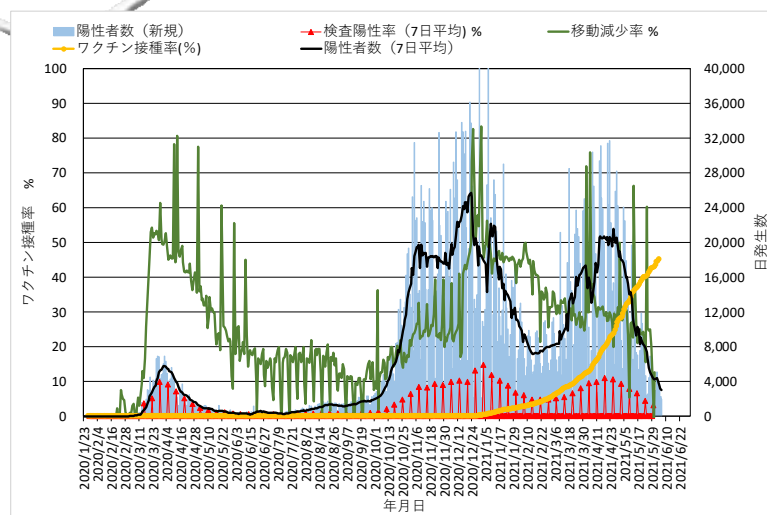


図 検査陽性者とワクチン接種率の推移 ドイツ

40.8% D-3

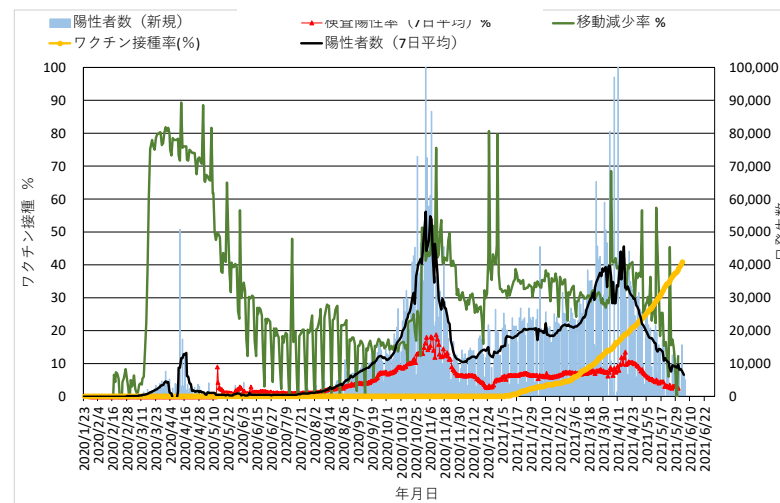


図 検査陽性者とワクチン接種率の推移 フランス

ワクチン接種に加えて、陽性率1%以下の
検査・隔離が必要



政策の最適化



期待効用理論

ロックダウンパラメータ $a : \beta \equiv (1 - a)\beta_0$

検査・隔離パラメータ q

対策 $M = M(a, q)$

コスト関数 $C(a, q)$

与えられた M に対して、コスト $C(a, q)$ を最小化する

$$F(\mu, a, q) = C(a, q) - \mu[M - M(a, q)]$$

μ : ラグランジュ未定定数

$$\frac{\partial F}{\partial a} = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial q} = 0,$$

$$\frac{\partial F}{\partial \mu} = 0$$

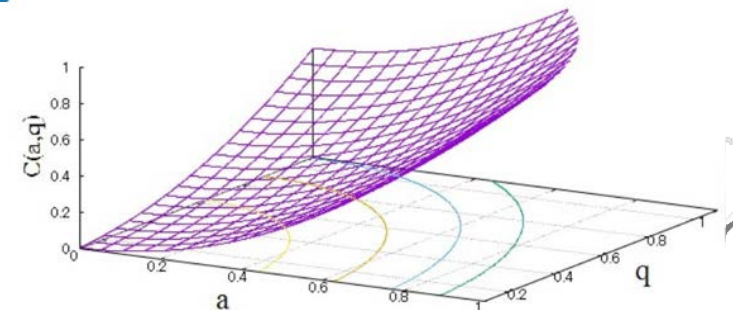
例: $C(a, q)$

$$C(a, q) = a^2 + k \left(\frac{q}{\beta_0} \right)^2$$

経済的コスト

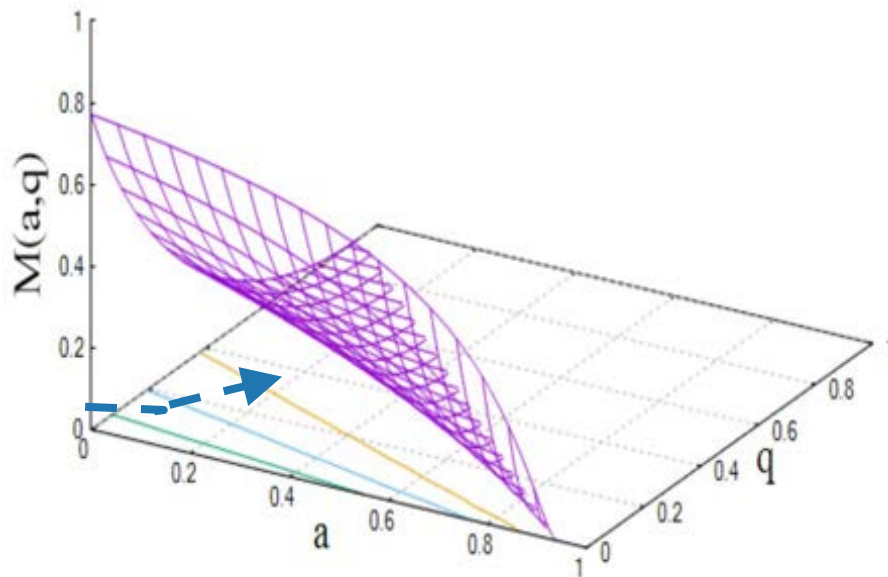
医療コスト

相対的重要性



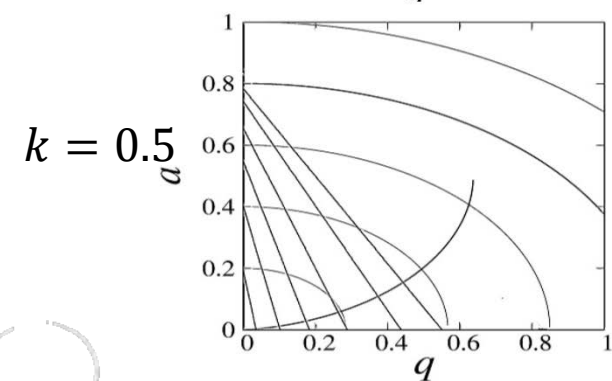
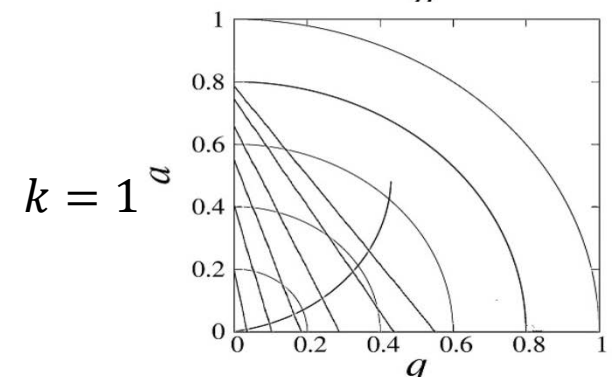
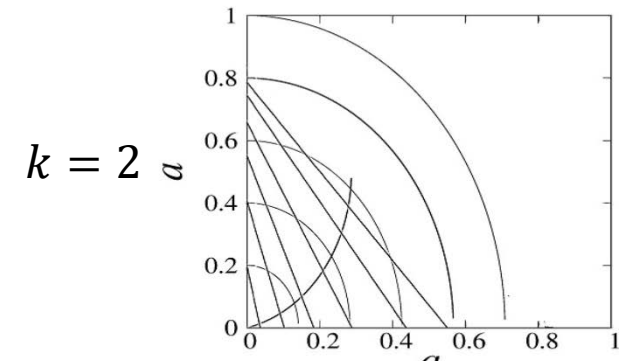
感染最大を抑える

$$M(a, q) = 1 - \frac{q + \gamma}{(1 - a)\beta_0} + \frac{q + \gamma}{(1 - a)\beta_0} \ln \frac{q + \gamma}{(1 - a)\beta_0}$$



$$\frac{\gamma}{\beta_0} = 0.06$$

$$a^*(1 - a^*)\beta_0^2 = kq^*(q^* + \gamma)$$

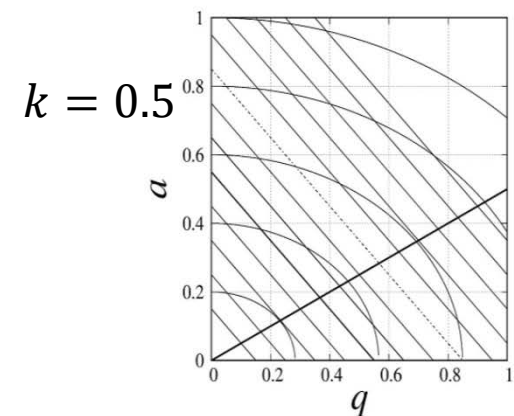
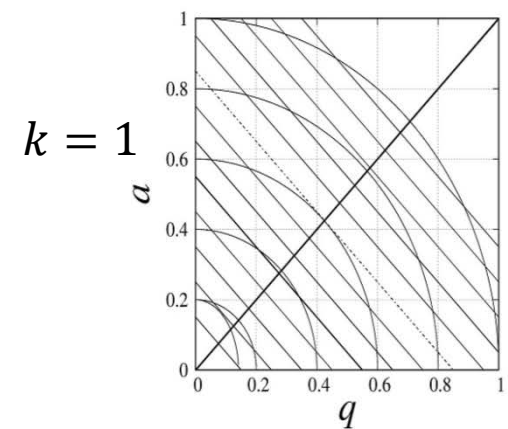
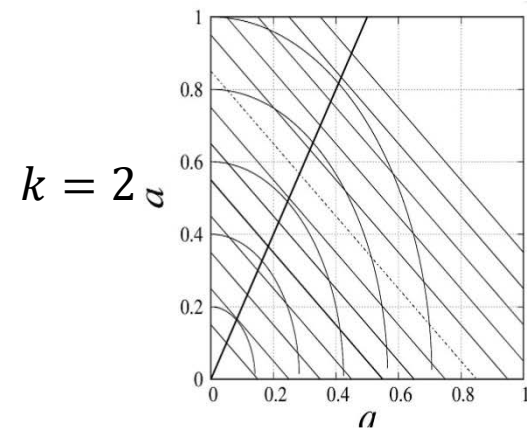
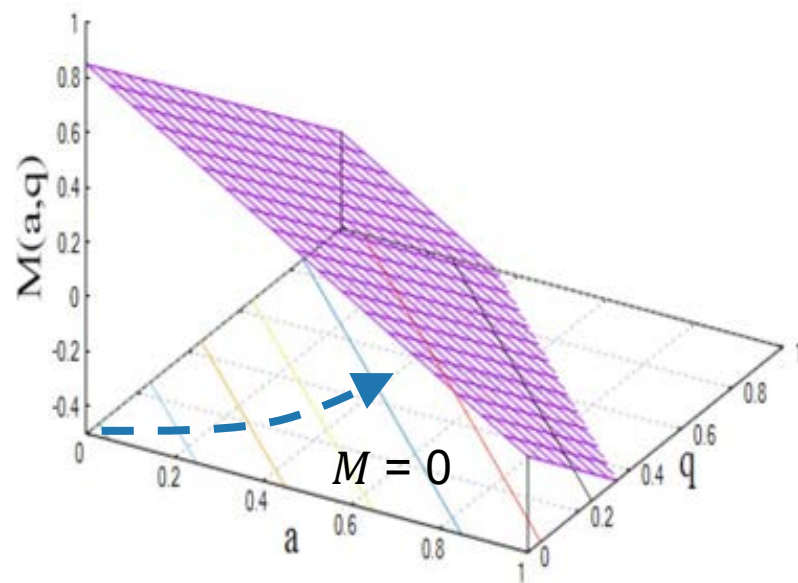


収束を早める

$$M(a, q) = (1 - a)\beta_0 - q - \gamma$$

$$a^* = k \frac{q^*}{\beta_0}$$

$$\frac{\gamma}{\beta_0} = 0.06$$





まとめに代えて

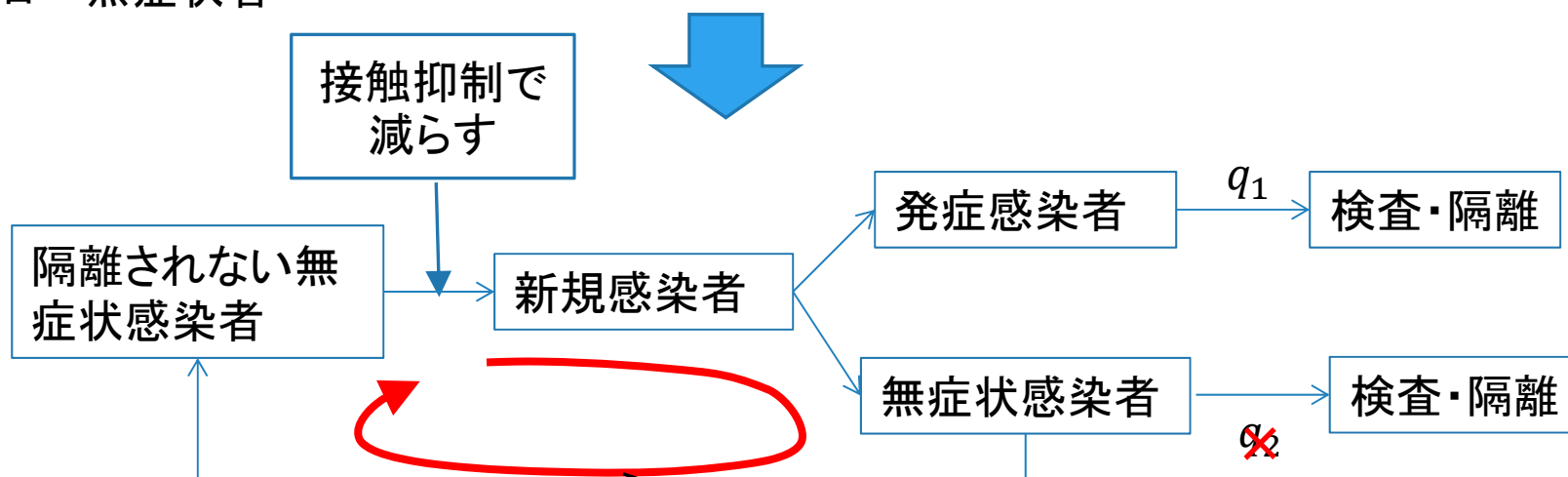
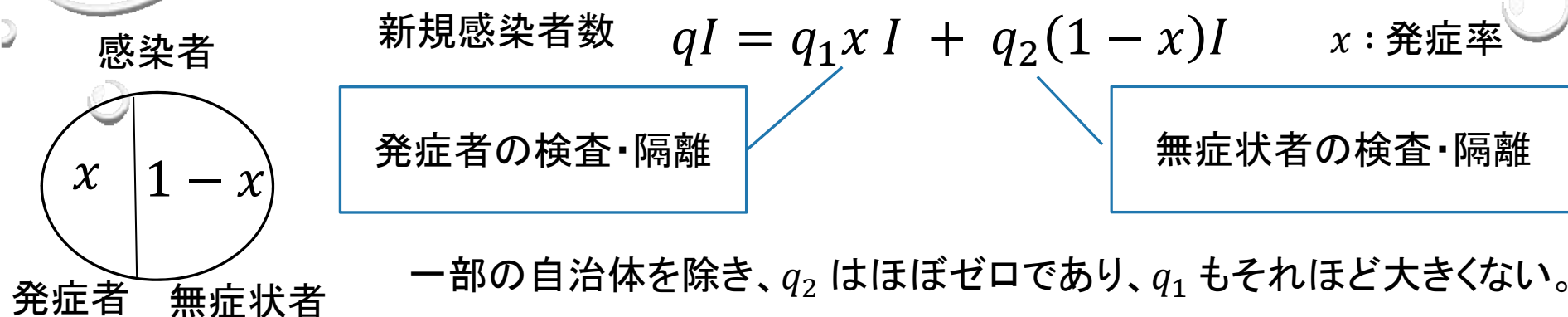


- ▶ SIQRモデルで、COVID-19 の特徴は理解できる
- ▶ 政策立案のための予言が可能
- ▶ 日本の対策は、SIRモデルに基づいて立案されているようで、

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たものになっている

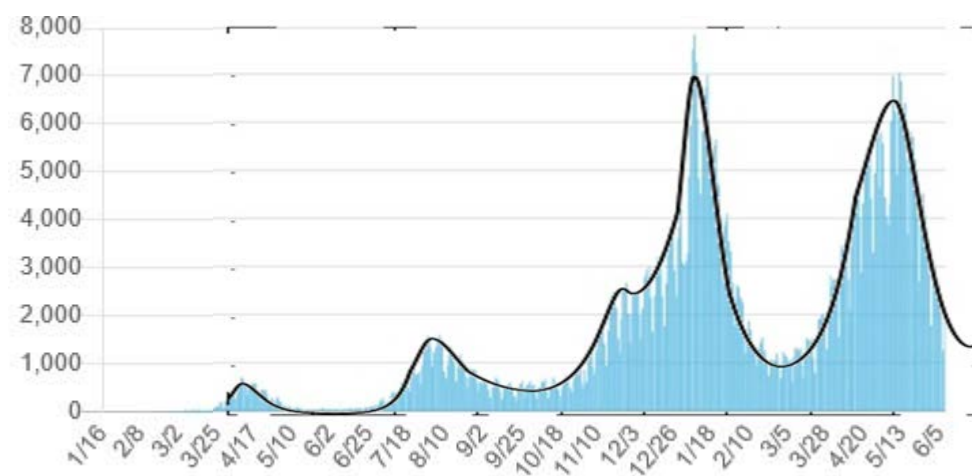
日本で何故感染が収束しないか



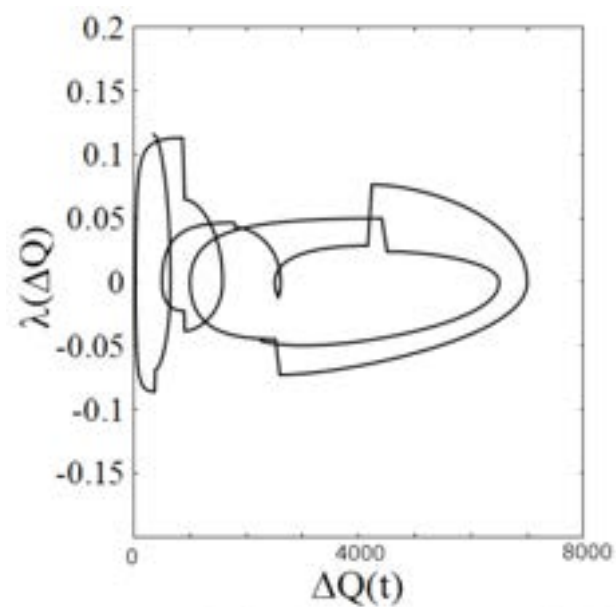
このループで下げ止まり、リバウンドが起こっている

感染を収束させるためには、無症状者対策が必須

2020/4/05~2021/06/08-6/30
新規感染者数Japan



感染状況図





おわり

有り難うございました

