新型コロナウイルス感染症の流行予測

正しく理解し、正しく怖がり、適切な行動をとるために

大橋　順

東京大学大学院理学系研究科
ヒトゲノム多様性研究室
http://www.bs.s.u-tokyo.ac.jp/~humgendiv/

はじめに

感染症流行モデルを用いて、
新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の
感染者数の推移を理論的に予測しました。

新型コロナウイルス感染症の感染力と重症化率を考えると、
爆発的患者急増により医療崩壊を引き起こし、
多くの方の命が失われる可能性があります。

感染症流行モデルの予測結果は、仮定するパラメタによって大きく変化します。行動（他者との接触頻度など）を制限することで、ピークが遅れ、ピーク時の発症者数が減少することが分かります。医療崩壊を防げるかどうかは、
我々の意識にかかっているのです。

基本再生産数R_0

基本再生産数は R_0 と表記され、
「集団中に1人の感染者（他の個体は感受性者）が存在する場合に、その感染者が感染力を失うまでに直接感染させる感受性者の人数」
を示す数値で、その病原体の感染力の指標となる

基本再生産数 R_0 は、
・病原微生物の特徴
・宿主（ヒト）中の感受性個体数、
・症状のある（感染力のある）期間
・各個体の行動など
様々な因子の影響を受ける（地域や状況が異なれば異なる）

代表的な感染症の基本再生産数R_0

感染症	感染経路	R0
麻疹	飛沫核感染	12–18
ジフテリア	唾液	6–7
天然痘	飛沫感染	5–7
ポリオ	経口感染	5–7
風疹	飛沫感染	5–7
流行性耳下腺炎	飛沫感染	4–7
新型コロナウイルス感染症(COVID-19)	飛沫感染	1.4–6.6
HIV/AIDS	性的接触	2–5
百日咳	飛沫感染	5.5
SARS	飛沫感染	2–5
インフルエンザ(スペインかぜ)	飛沫感染	2–3
エボラ(2014 Ebola outbreak)	血液感染	1.5-2.5

出典: フリー百科事典『ウィキペディア（Wikipedia）』

感染の流行終息条件

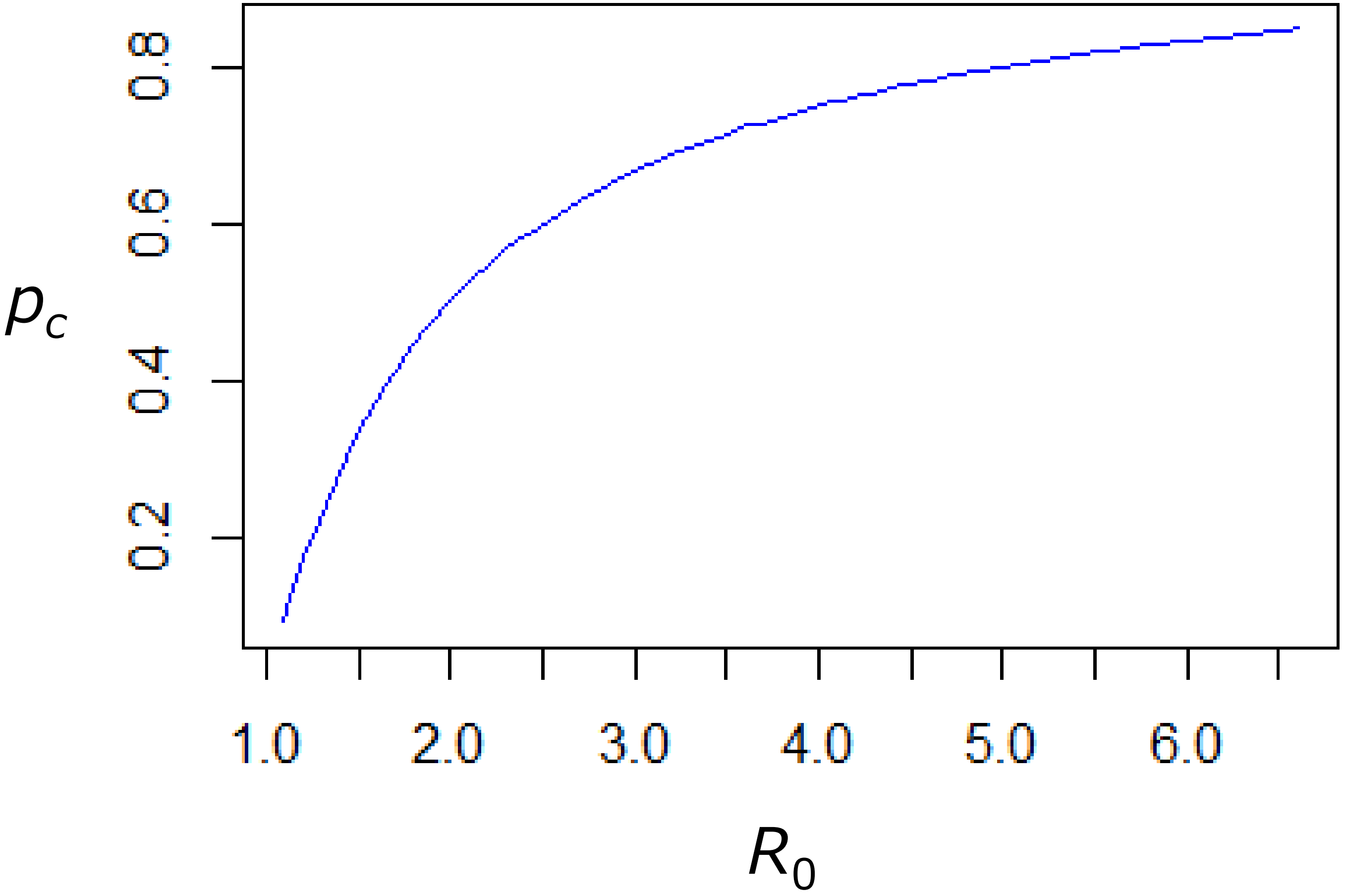
既感染者（感染者や免疫を獲得した回復者）の割合が増えれば感染する人数が減り、最終的に感染は終息する

集団中の既感染者の割合を p $(0<p<1)$ とおくと、
新たな感染は未感染者 $(1-p)$ に対して起こるので、
1人の感染者が感染させる感受性者数は $(1-p)\times R_0$

流行が終息に向かう（1人の感染者から感染する人数が1を下回る）条件は $(1-p)\times R_0<1$ であり
p について解けば $p>1-1/R_0$ となる
よって、既感染者割合が $p_c=1-1/R_0$（ p_c : 集団免疫閾値）を超えると終息に向かう（終息するわけではない）

ただし、以上の計算からは**ピーク時の発症者数**や**最終的な感染経験者数**を予測することはできない

集団免疫閾値



ヒト-ヒト感染症のモデル

感受性者（未感染）		潜伏期感染者（感染力無）		発症者（感染力有）		回復者（免疫獲得者）
Susceptible	→	**E**xposed	→	**I**nfectious	→	**R**ecovered

本資料で扱うヒト-ヒト感染症のモデルでは、
感受性者（未感染者）が感染すると、一定の潜伏期間を経て発症し、回復したら再び感染することはないと仮定する

新型コロナウイルス感染症では、一定の割合で無症候性キャリア（症状が無くとも感染力を有する感染者）が存在することが報告されているが、本資料中では、感染したら全ての人が発症する（感染力有）と仮定して計算を行う

感染症流行モデルでは、単位時間当たり
ある状態からある状態にどれだけの人が遷移するかを
微分方程式を用いて記述する

初期状態 t=0 でXの状態にある人が X_0 人いて
単位時間当り α の割合で状態Yに遷移する
状態Xにある人の数を X とおけば、単位時間当たりの
X の変化は次の微分方程式により記述できる

$$\frac{dX}{dt} = -\alpha X$$

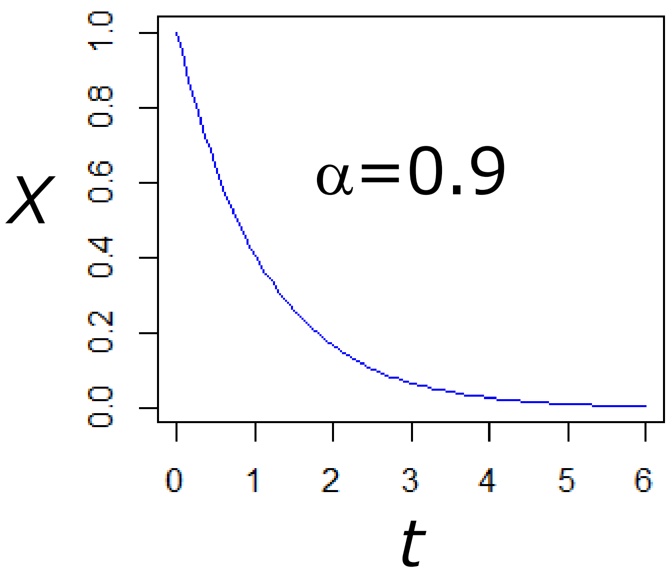
この微分方程式を解くと

$$\frac{dX}{X} = -\alpha dt$$

$$\ln X = -\alpha t + C$$

$$X = e^{-\alpha t + C}$$

$$X_t = X_0 e^{-\alpha t}$$



指数分布

状態Xから状態Yに遷移する確率が単位時間当り α であるとき、
遷移するまでの時間（待ち時間）の期待値を考える
時刻 t に遷移する確率を $f(t)$ とすると

$$f(t) = \left|\frac{dX}{dt}\right| / X_0 = \frac{|-\alpha X|}{X_0} = \alpha e^{-\alpha t}$$

待ち時間の期待値は

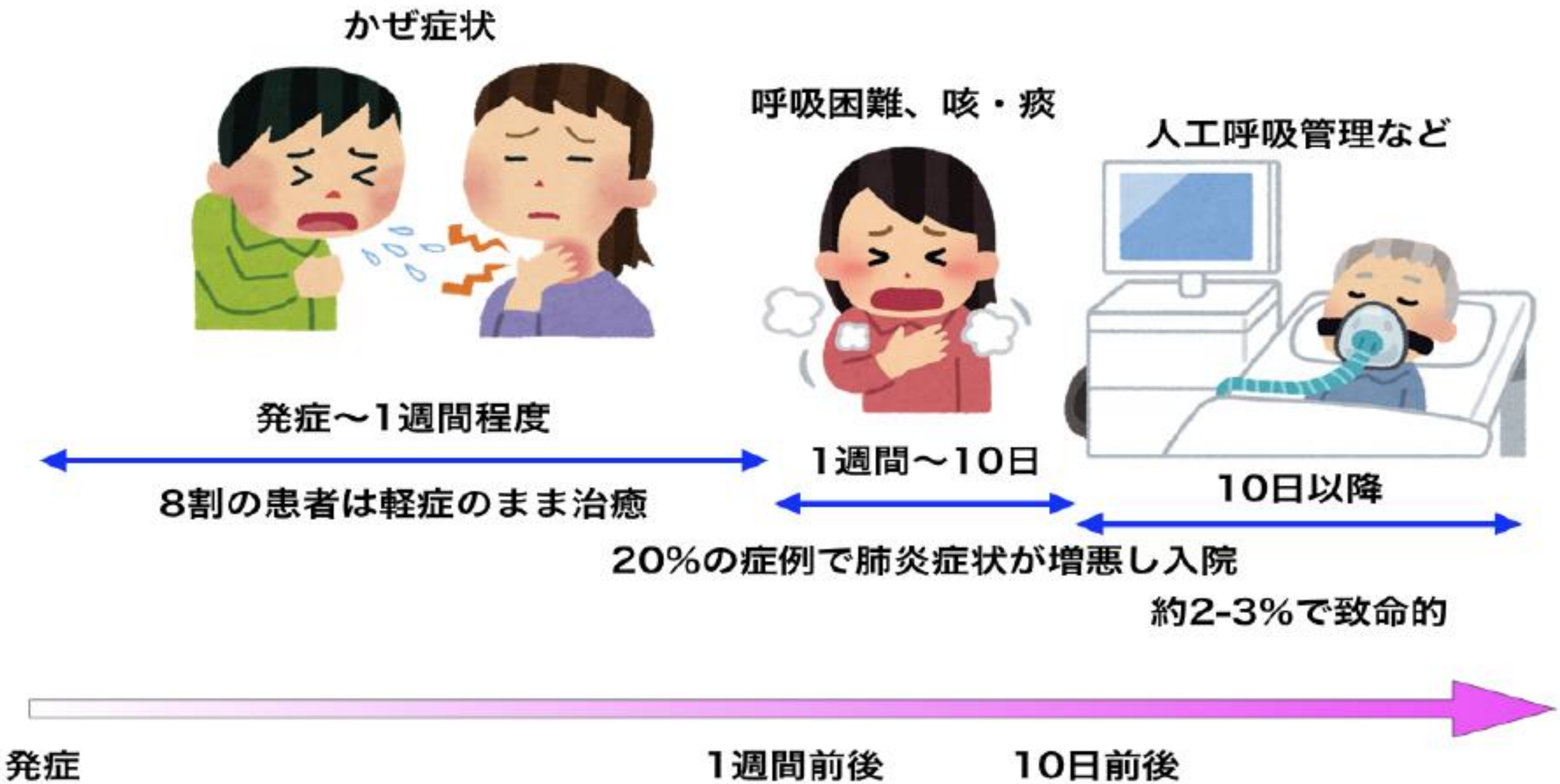
$$E[t] = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty \alpha t e^{-\alpha t} dt = \underbrace{[-te^{-\alpha t}]_0^\infty}_{0} + \int_0^\infty e^{-\alpha t} dt$$

$$= \left[-\frac{1}{\alpha} e^{-\alpha t}\right]_0^\infty = \frac{1}{\alpha}$$

$\boxed{\text{遷移待ち時間から時間当りの遷移確率を推定できる}}$

9

新型コロナウイルス感染症の典型的な経過（状態遷移の待ち時間）



新型コロナウイルス感染症（COVID-19）診療の手引き・第１版

SEIRモデル

感受性者（未感染）		潜伏期感染者（感染力無）		発症者（感染力有）		回復者（免疫獲得者）
Susceptible	→	**E**xposed	→	**I**nfectious	→	**R**ecovered

$$\frac{dS}{dt} = -\alpha_t I$$

$$\frac{dE}{dt} = \alpha_t I - \beta E$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta E - \gamma I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I$$

S: 感受性者数
E: 潜伏期にある感染者数
I: 発症者数
R: 回復（死亡含）者（2度と感染しない）
N: 全個体数（N=S+E+I+R）
（出生・死亡は考慮しない）

α_t: 時刻 t における1人の発症者が単位時間当りに感受性者を感染させる人数
β: 単位時間当りの発症率
γ: 単位時間当りの回復率

R_0 と α_t の関係

α_0：集団中に1人の発症者しかいない場合に、発症期間中の単位時間（1日）当りに感染させる感受性者数
i: 平均発症期間（時間によらず一定）
と定義すると
$R_0 = \alpha_0 \times i$ と表すことができる
よって、$\alpha_0 = R_0/i$

感受性（未感染）者が減れば 1人の発症者が発症期間中に感染させる人数は減少する
ある時刻 t における1人の発症者が発症期間中の単位時間（1日）当りに感染させる感受性者数を α_t とおくと
$\alpha_t \fallingdotseq \alpha_0 \times S_t/N = R_0/i \times S_t/N$
S_t: 時刻 t における感受性者数
N: 全個体数（一定）

各遷移確率を待ち時間から与える

感受性者（未感染）	潜伏期感染者（感染力無）	発症者（感染力有）	回復者（免疫獲得者）
Susceptible	**E**xposed	**I**nfectious	**R**ecovered

Susceptible → Exposed → Infectious → Recovered

平均5日　　平均10日

$$\frac{dS}{dt} = -\left(\frac{R_0}{i}\right)\frac{S}{N}I$$

$$\frac{dE}{dt} = \left(\frac{R_0}{i}\right)\frac{S}{N}I - \left(\frac{1}{l}\right)E$$

$$\frac{dI}{dt} = \left(\frac{1}{l}\right)E - \left(\frac{1}{i}\right)I$$

$$\frac{dR}{dt} = \left(\frac{1}{i}\right)I$$

R_0: 基本再生産数（2.0, 2.5, 3.0）
l: 平均潜伏期間（5日）
i: 平均発症期間（10日）

$\alpha_t \rightarrow (R_0/i) \times (S/N)$（1人の発症者が1日当り感染させる人数）

$\beta \rightarrow 1/l$（潜伏期感染者が1日当り発症するする確率）

$\gamma \rightarrow 1/i$（発症者が1日当り回復する確率）

日本における新型コロナウイルス感染症のR_0

基本再生産数 R_0 は地域や状況が異なれば異なり、
正確に推定することは難しい
日本国内でも地域によって異なる
そこで、本資料中では

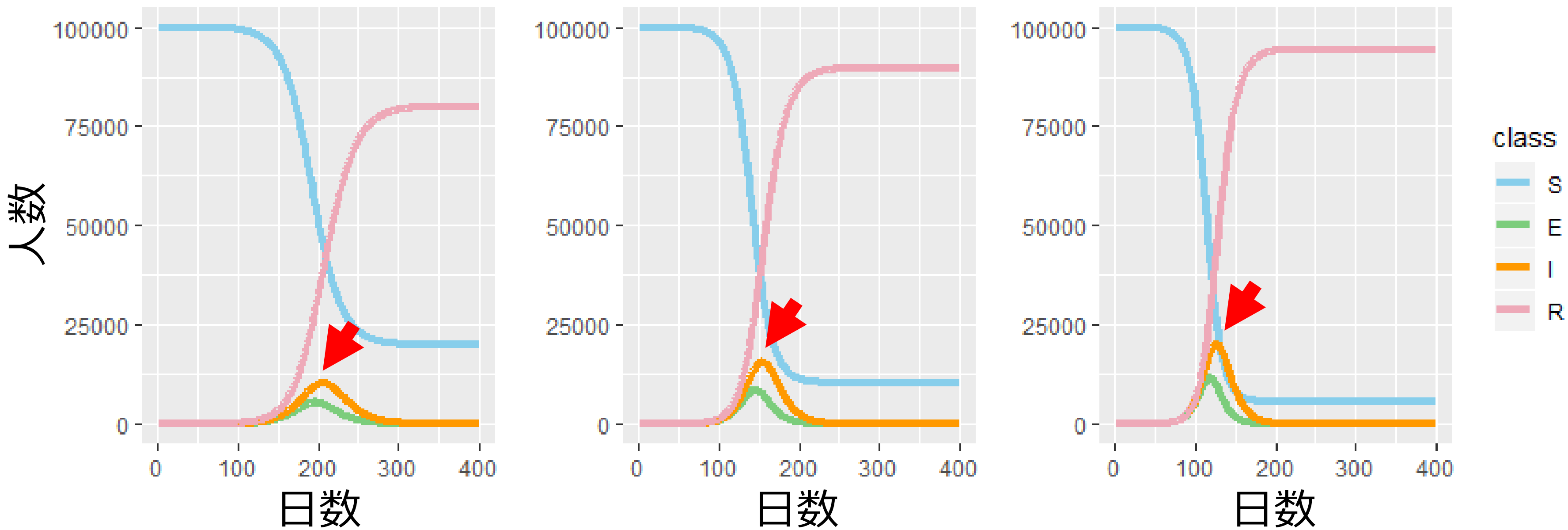
$R_0 = 2.0$
$R_0 = 2.5$（欧州「ドイツ」並み）
$R_0 = 3.0$

の3通りで計算を行う。

SEIRモデルによる予測結果

10万人の都市に1人の発症者が出現したと仮定

R_0=2.0　　R_0=2.5　　R_0=3.0



R_0が小さいほど
- ピーク時（図中）の発症者数 I が少ない
- ピークが遅い
- 最終的な回復者数（感染者数）R が少ない

厚生労働省は、新型コロナウイルスの感染が今後、ピークを迎えたときに備えて医療体制を整備するよう自治体に要請していて、患者が入院する病床の確保が喫緊の課題となっています。

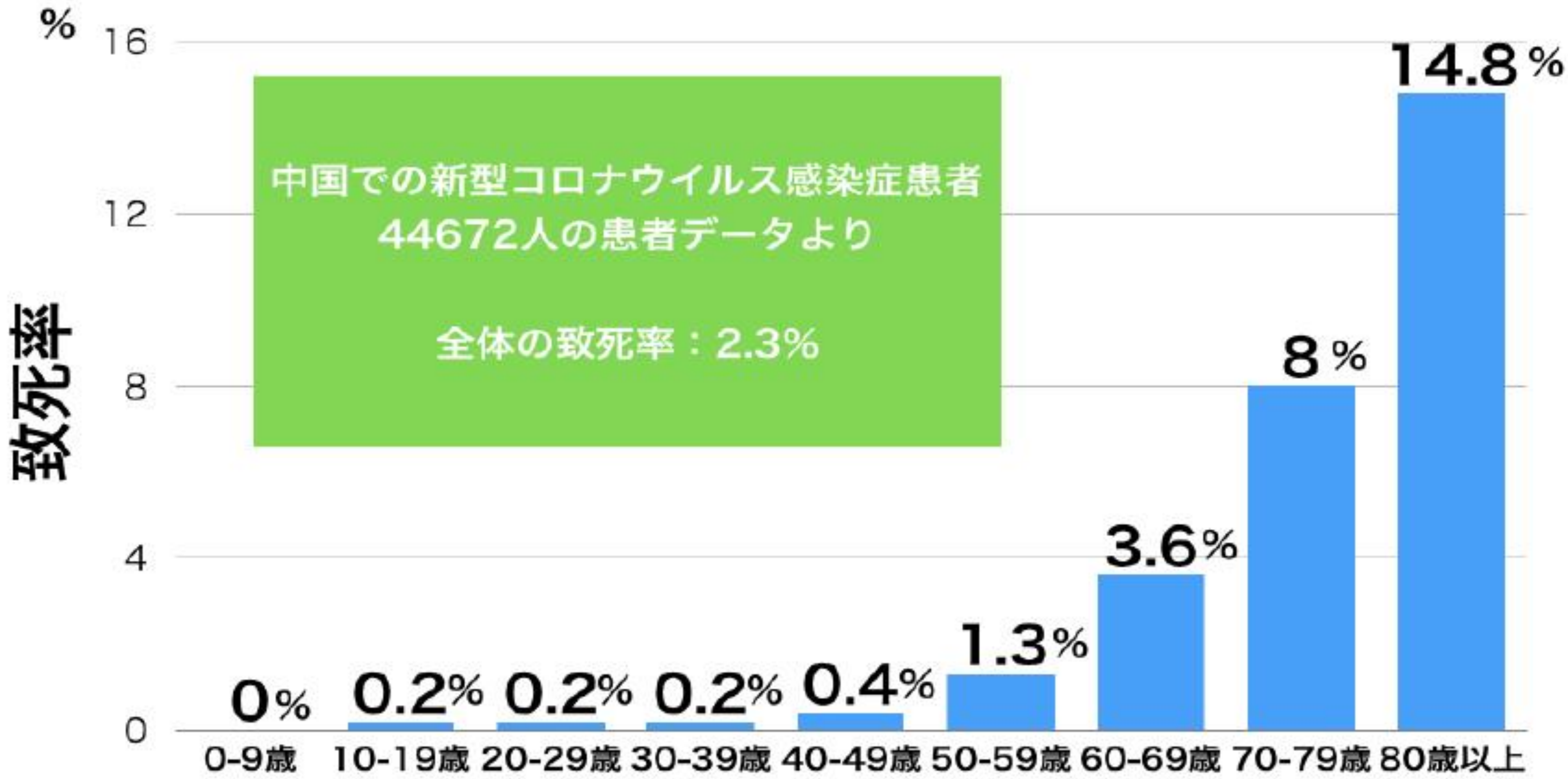
東京都は、患者が入院する病床として、これまでに感染症指定医療機関にある感染症に対応した病室などで合わせて140床を確保していましたが、26日時点で入院が必要な患者はすでに223人に上っていて、一般の医療機関にも協力を求めて確保しています。

厚生労働省が示した計算式では、感染がピークを迎えると、東京都では１日当たり、集中治療や人工呼吸器が必要な重症の患者が約700人、肺炎の治療など入院が必要な患者が約２万500人に上るとされ、東京都では、最大で4000人分の病床を段階的に確保していく方針をまとめました。

NHK NEWS WEB
新型コロナ感染ピーク時 目安の病床数確保難しい現状明らかに
2020年3月27日 18時26分
https://www3.nhk.or.jp/news/html/20200327/k10012353801000.html
より一部抜粋

上記患者数の推定に用いた計算式を本資料の最後に掲載する

新型コロナウイルス感染症の年齢別致死率



JAMA. 2020 Feb 24. doi: 10.1001/jama.2020.2648.

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）診療の手引き・第１版

最大の課題

新型コロナウイルス感染症患者は
基本的には、感染症指定医療機関に入院することになる

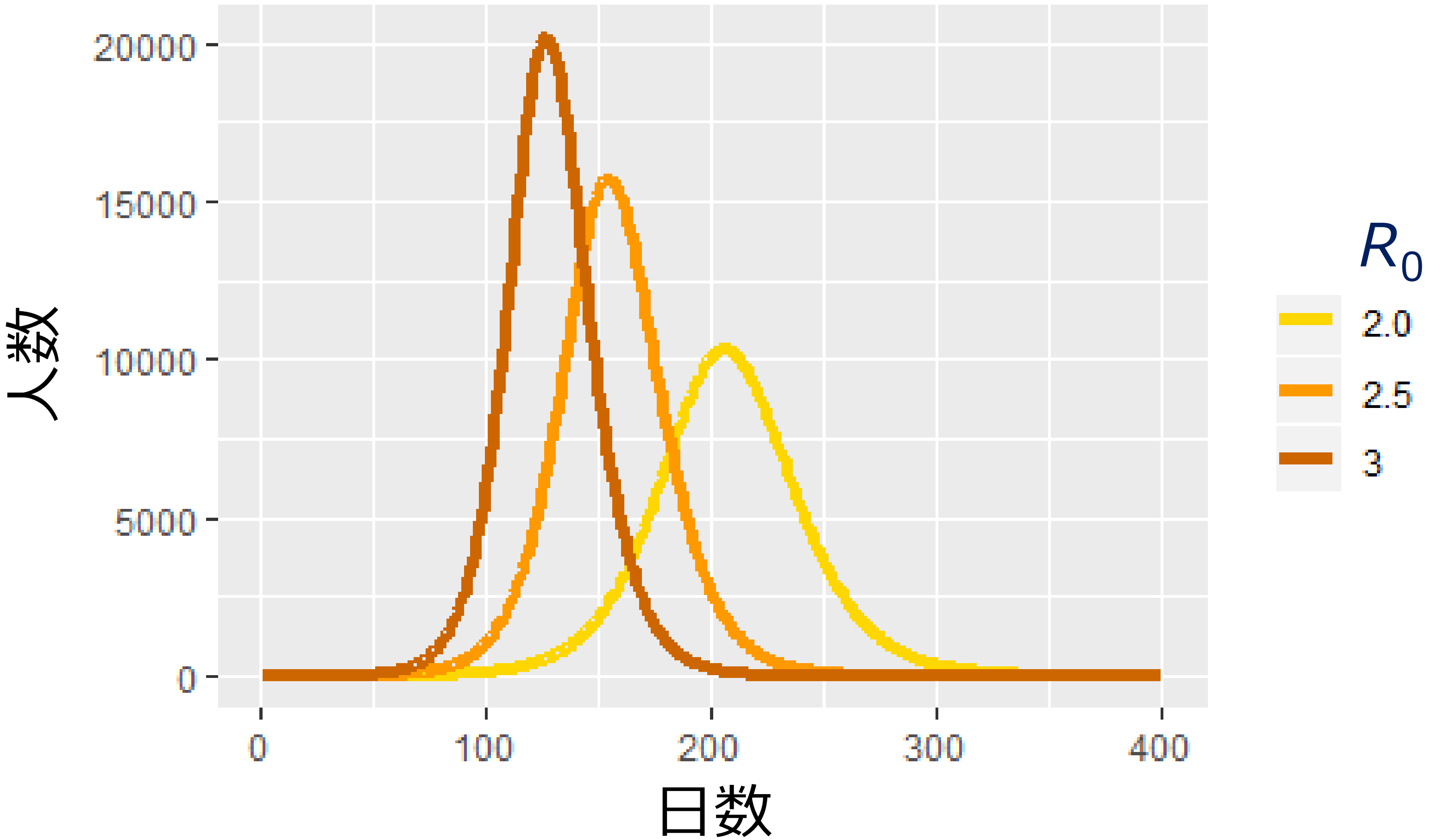
流行のピーク時に入院が必要な患者数が医療機関の受入れ可能人数を上回ると、いわゆる「医療崩壊」を引き起こし、本来であれば助かった患者が入院できずに亡くなるような事態も起こりうる

ピーク時の発症者数を抑え、ピークを遅らせることは
新型コロナウイルス感染症で最も重要な対策の一つ

なお、無症候キャリアが*x*の割合存在すると発症者数は
1-*x*倍になるので、本資料の計算では発症者数を
過大評価していることに注意されたい

R_0による発症者数 I の違い

10万人の都市に1人の発症者が出現したと仮定



発症者の20%が重症化するとすると、どの場合でもピーク時に医療崩壊を招く可能性が極めて高い

行動変容

$R_0 = \alpha \times i = \alpha' \times n \times i$
α: 1人の患者が1日当り感染させる人数
i: 発症（感染させる）期間
α': 1回の接触当り感染させる確率
n: 1日に接触する人数（行動量）

α は α' および n に比例する（$\alpha = \alpha' \times n$）
α を下げるには、
マスク着用など → α' ↓
患者隔離、外出自粛など → n ↓
が有効である
外出を控えて n を半分にすれば α は半分になる
これは R_0 が半分となることに相当する

モデル上での行動変容の扱い

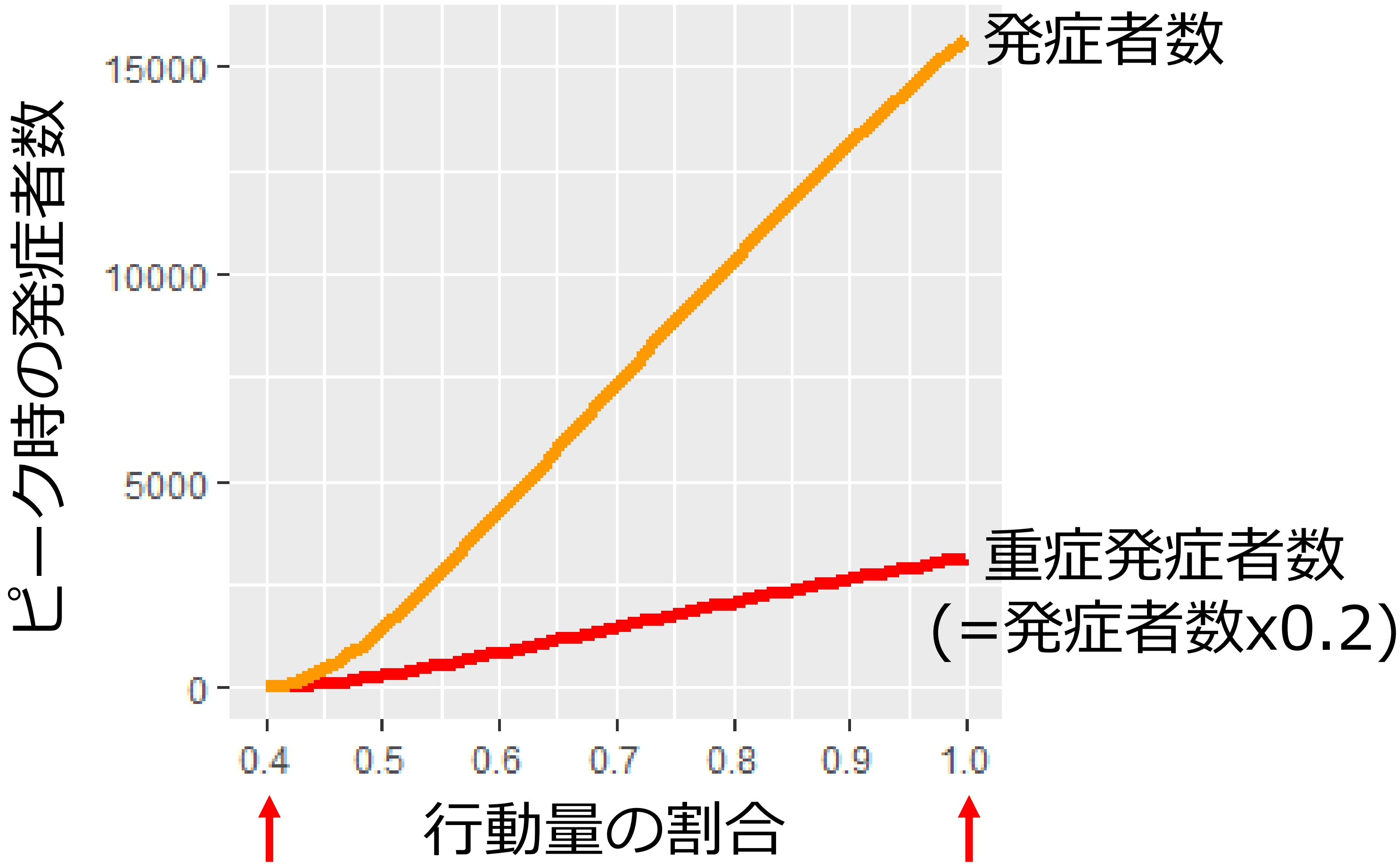
感染力が高い新型コロナウイルス感染症の拡大を防ぐには行動を変える必要がある

モデル上は発症者のみが行動量を減らす（1日に接触する人数 n が減る）と仮定して計算を行う

実際には、無症候キャリアが存在するため、発症者のみならず全員が行動を減らす努力が必要である
感受性者も行動量を減らせばさらに効果は上がる

発症者行動変容の効果（R_0=2.5の場合）

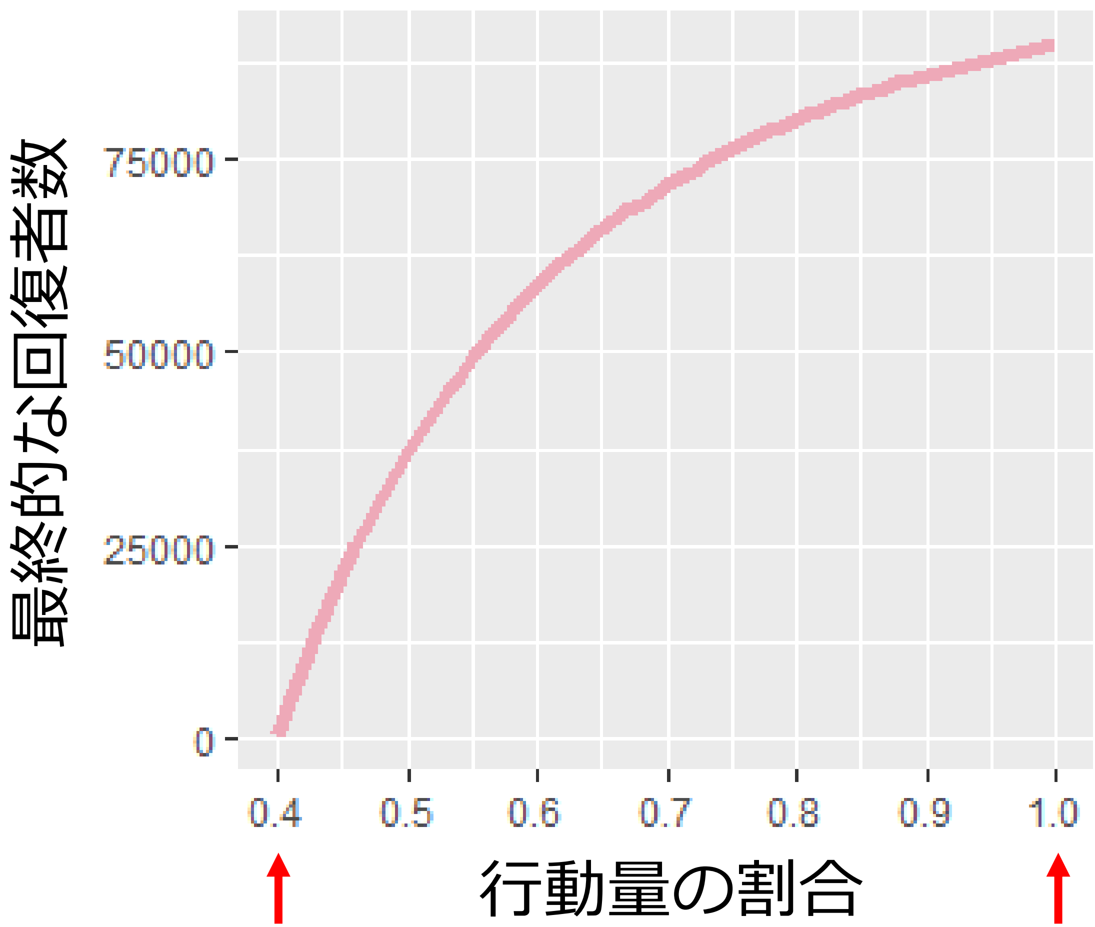
10万人の都市に1人の発症者が出現したと仮定



$1/R_0$まで減少させた場合　いつも通り

発症者行動変容の効果（R_0=2.5の場合）

10万人の都市に1人の発症者が出現したと仮定



1/R_0まで減少させた場合　　　いつも通り

R_0が2.5であるとき

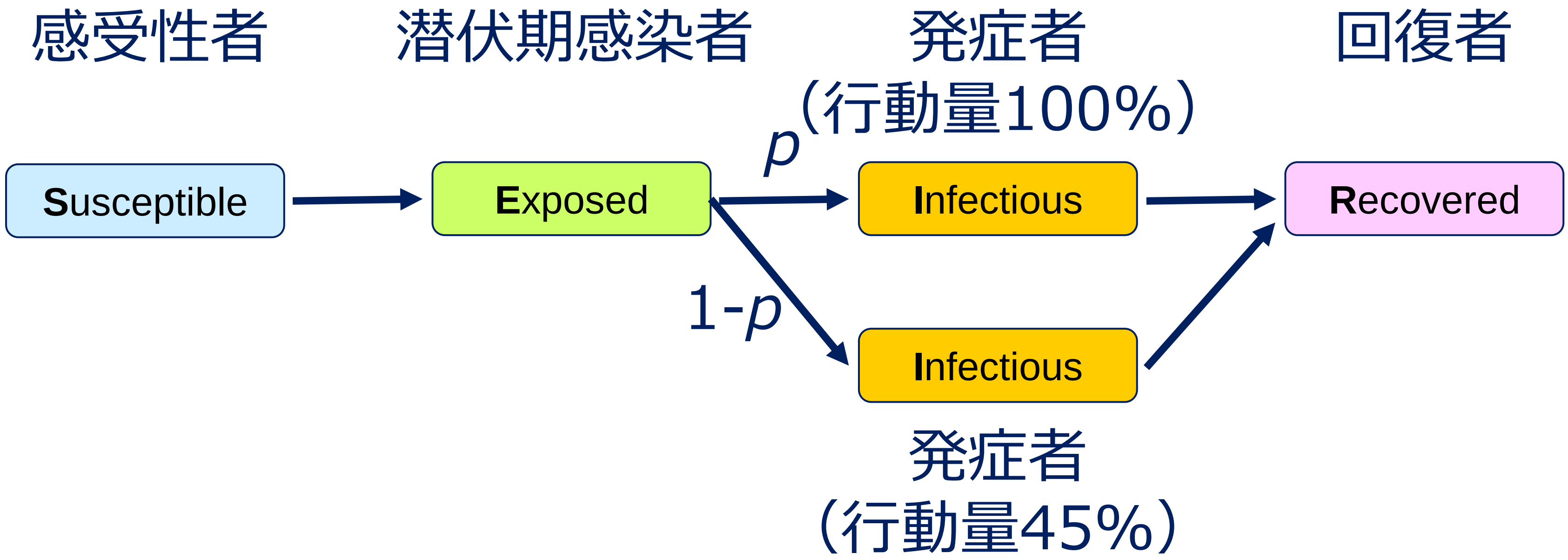
- 60%（=1-1/R_0）の人が感染すると感染は終息に向かう

- 対策を講じないと90%の個体が感染を経験
ただし、本資料で扱ったSEIRモデルは
i) 年齢によるパラメタの違いを考慮していない
ii) 入院による発症者隔離の効果を考慮していない
iii) ウイルスに曝露しても感染しにくい個体の存在
などを考慮しておらず、90%は過大評価といえる

- 外出制限など各人の行動量（他人との接触頻度）を
いかに40%（=1/R_0）に近づけるかが重要

- 発症者の行動量を50%にすることと45%にすることは
それほど大きな差ではないが、効果には大きな差がある

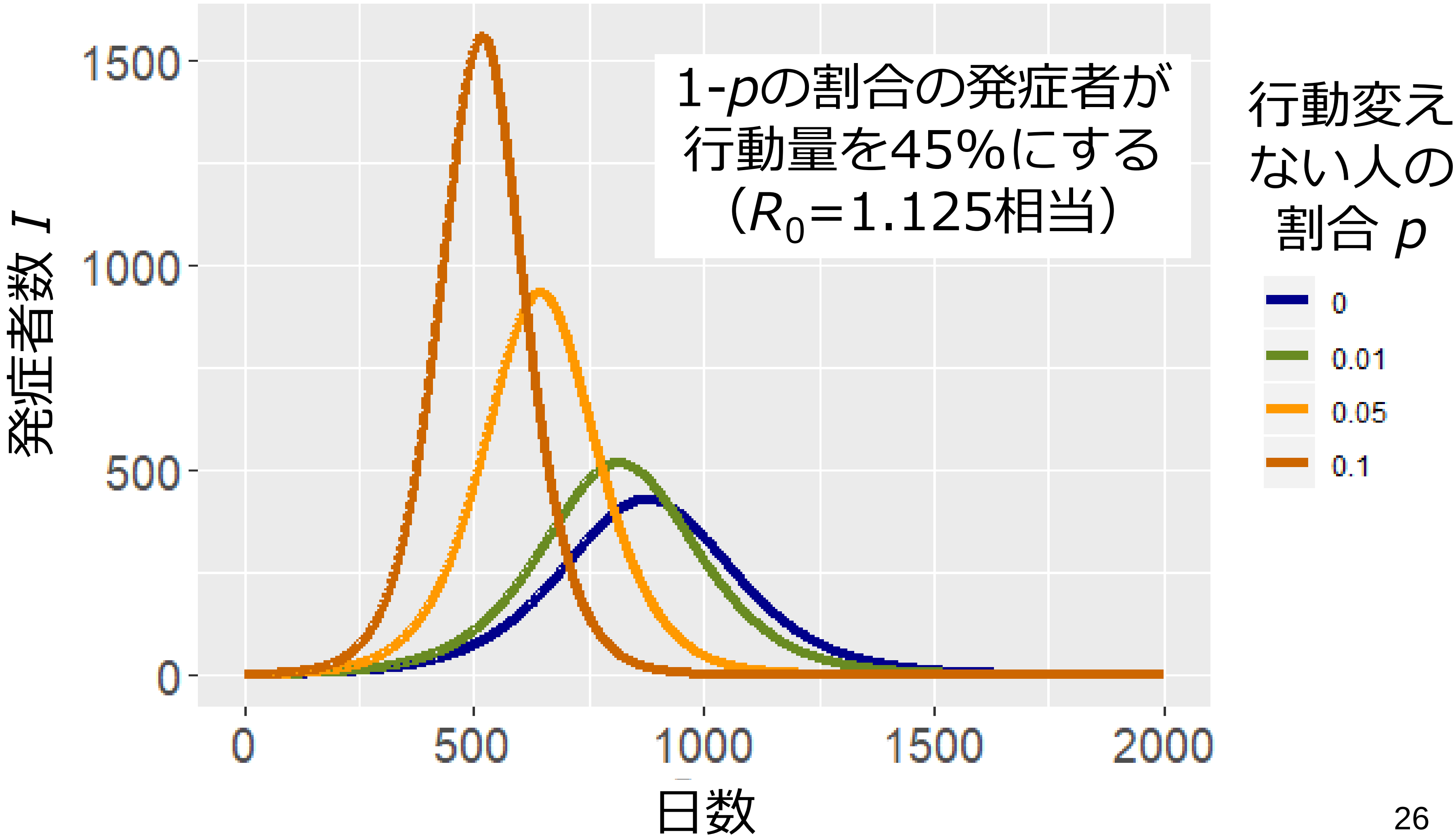
行動量に差のあるグループを考慮



発症しても行動を変えない人（無症候キャリアなど）の割合が及ぼす影響をみるため
割合 *p* の人は行動を変えず、
割合 1-*p* の人は45%まで行動量を下げたと仮定する

なお、発症者数には行動を変えない人（無症候キャリアなど）も含めてある

行動量を減らさない人の影響（R_0=2.5の場合）



ほぼ全ての発症者が行動量を45%に下げたとしても
わずか1%でも行動を変えない人がいると
その効果は大きく損なわれる

感受性者が行動を減らせば、感染拡大をさらに防ぐこと
ができるので、無症候キャリア（感染している認識が無
い者）も含め、全員が予防行動をとることが重要である

新型コロナウイルス感染症を封じ込めは
我々全員の意識にかかっている！

おわりに

無症候キャリアの存在、年齢階級別の感染率・発症率の違いなどを考慮しておらず、本資料の予測結果は発症者数を過大評価しています。それでも、新型コロナウイルス感染症での感染者数のおよその推移や行動を変える重要さをご理解いただけたと思います。

新型コロナウイルス感染症は、集団免疫を獲得するまでは何度でも流行する可能性があります。無症候キャリアが存在するため、すぐに弱毒化することもないでしょう。ワクチンなどが開発されない限り、長い闘いを覚悟せねばなりません。行動抑制を長期にわたり続けることは難しいでしょう。
しかし、皆が協力することで、この困難を必ず乗り越えることができると信じています。

最後までお読み下さいましてありがとうございました。

参考

厚生労働省の計算式

（2020年3月6日）

（１）（ピーク時において 1 日あたり新たに新型コロナウイルス感染症を疑って外来を受診する患者数）＝（0-14 歳人口）×0.18／100＋（15-64 歳人口）×0.29／100＋（65 歳以上人口） ×0.51／100

（２）（ピーク時において 1 日あたり新型コロナウイルス感染症で入院治療が必 要な患者数）＝（0-14 歳人口）×0.05／100＋（15-64 歳人口）×0.02／ 100＋（65 歳以上人口）×0.56／100

（３）（ピーク時において 1 日あたり新型コロナウイルス感染症で重症者として 治療が必要な患者数）＝（0-14 歳人口）×0.002／100＋（15-64 歳人口） ×0.001／100＋（65 歳以上人口） ×0.018／100