

沖縄での緊急事態宣言と ワクチン接種効果推定

2021.6.8

筑波大学 倉橋節也

サマリー

1. 沖縄県の3月から12月までの感染者数と重症者数をシナリオ分析

3月1日から6月4日までの県内の新規陽性者と県外からの感染者流入推定値を用いたSEIRモデル（感染数理モデル+AI最適化）を構築し、0.6名/日の精度で15歳～39歳、40歳～59歳、65歳以上の3つの年代内および年代間での感染推定モデルを構築した。ワクチン接種0.8%/dayの速度で、新規陽性者数のサーキットブレーカー効果を推定した。CB効果の減少率は、2020年8月の緊急事態宣言発出時の効果と同等とした。2021年6月5日以降の実効再生産数の推移は同年4月15日以降、2021年8月以降は昨年と同等とするシナリオを設定した。

2. 緊急事態宣言を解除した場合、7月以降に感染拡大が発生する可能性がある

N501Y変異種（アルファ型）の感染力が強いことから、5月24日からの緊急事態宣言を6月20日で解除した場合、7月以降に再び感染が拡大し、最大で600人を超える新規感染者が発生する可能性がある。感染者数に対するワクチンの効果は限定的であり、若年層、成年層への早期のワクチン効果は見込めないことが要因と考えられる。一方で重症患者数のピークは大幅に減少し、20名程度に抑制できる効果は見られた。新規感染者数に対する効果的な抑制戦略は、強力なサーキットブレーカーであり、発動を新規感染者200人とした場合、感染者数ピークが約300人、同150人で約240人、同100人で約140人まで抑制できる効果が見られた。

3. 一般向けの接種は年代別に中年層を優先する必要性は低い

高齢者向けのワクチン接種と並行して中年層（40歳～59歳）へ優先接種するよりも、青年層および中年層への同時並行接種、あるいは青年層優先接種の方が効果が高く、9月以降の新規陽性者数を2割以上抑えられる可能性が示唆された。一方で、サーキットブレーカーが効果的に適用された場合は、ワクチン接種の年代別接種効果はほとんど差異がない。

なお、本シミュレーションでは、変異ウイルスはN501Yのみを対象としているため、デルタ型などの更に感染力を増した変異ウイルスや重症化率が高い影響などについては、今後注視する必要がある。

年代別ワクチン優先接種比較

- ワクチン接種0.8%/日
- サーキットブレーカーなし

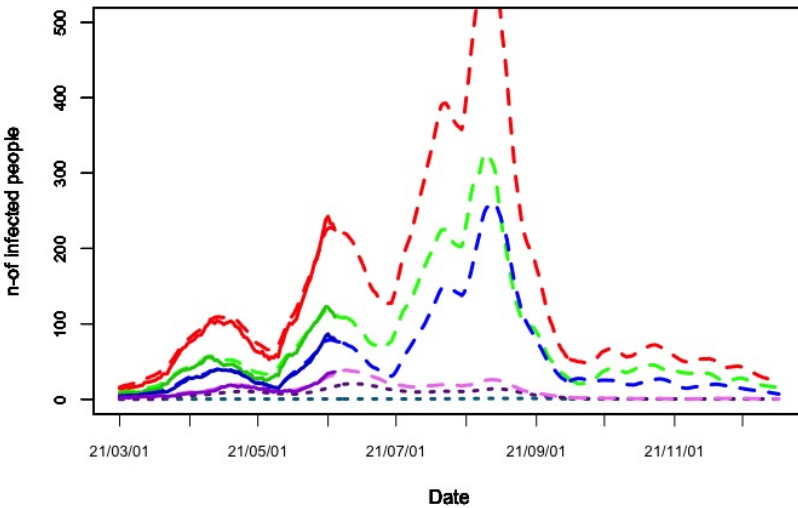
- 年代グループ
 - Y : 15歳～39歳
 - M : 40歳～64歳
 - E : 65歳～

E1.0→Y:0.5, M:0.5

E1.0→Y:0.2, M:0.8

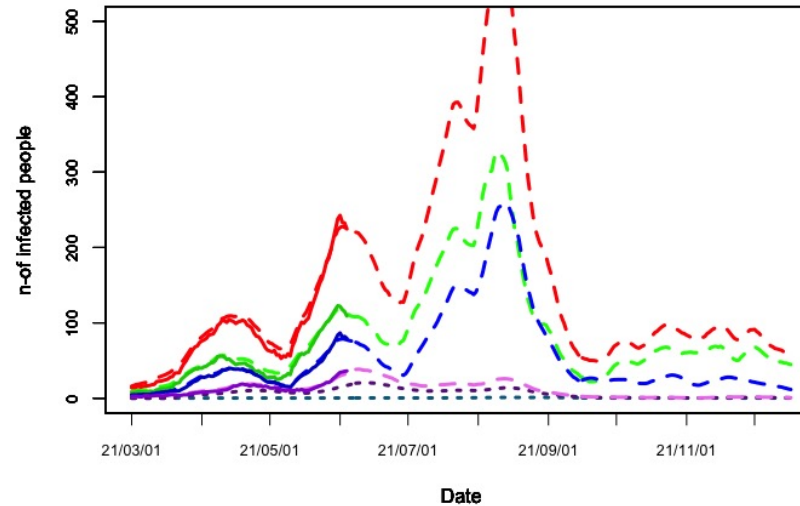
E1.0→Y:0.8, M:0.2

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



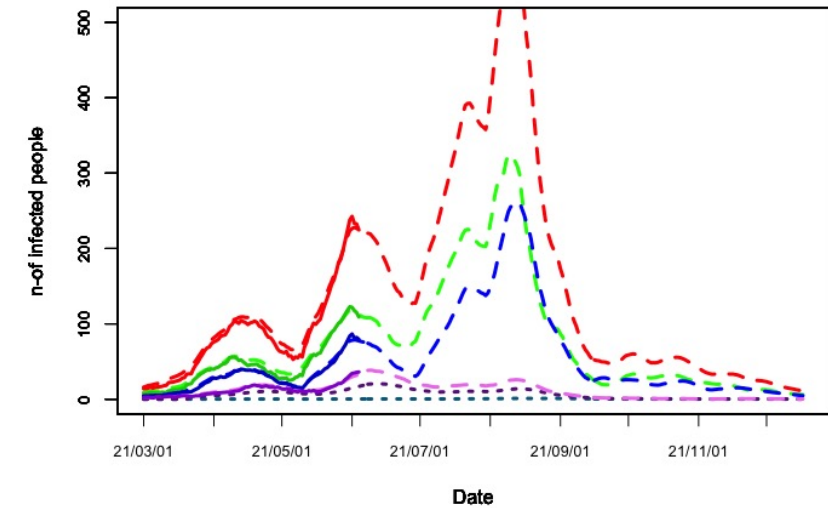
5p 20210811 : 605
 5s 20210815 : 15 Es 14 As 1
 6p 20211024 : 72
 6s 20210918 : 2 Es 1 As 0

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



5p 20210811 : 605
 5s 20210815 : 15 Es 14 As 1
 6p 20211025 : 98
 6s 20210918 : 2 Es 1 As 0

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



5p 20210811 : 604
 5s 20210815 : 15 Es 14 As 1
 6p 20211004 : 60
 6s 20210918 : 2 Es 1 As 0

年代別ワクチン優先接種比較

- ワクチン接種0.8%/日
- サーキットブレーカーなし

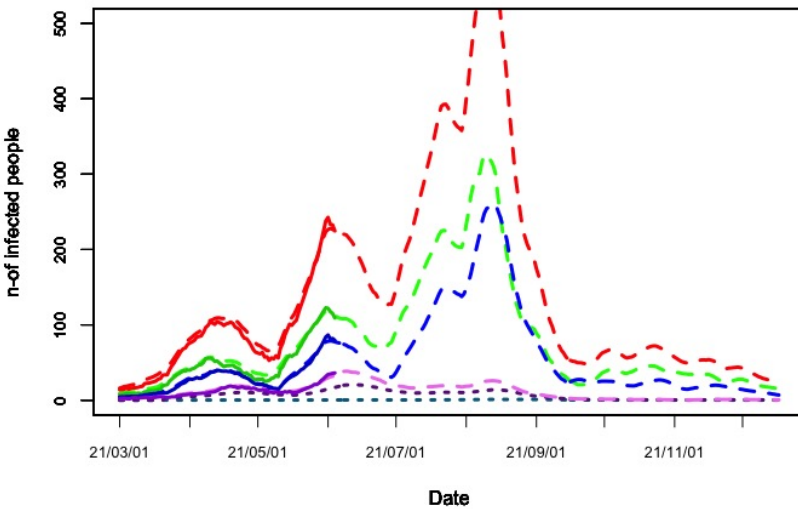
- 年代グループ
 - Y : 15歳～39歳
 - M : 40歳～64歳
 - E : 65歳～

E1.0→Y:0.5, M:0.5

E0.9→Y:0.5, M:0.5

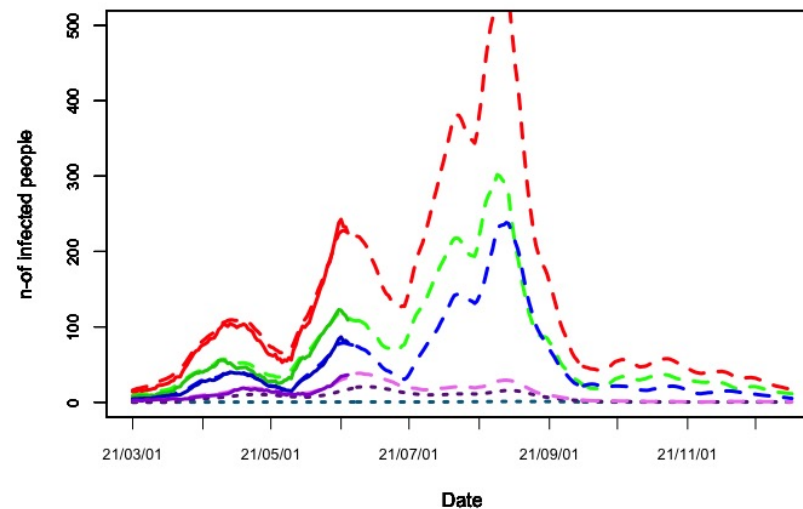
E0.8→Y:0.5, M:0.5

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



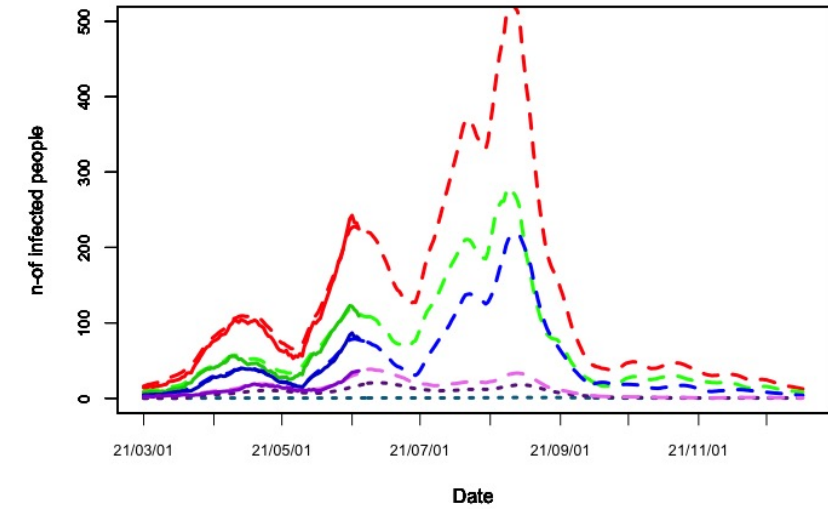
5p 20210811 : 605
 5s 20210815 : 15 Es 14 As 1
 6p 20211024 : 72
 6s 20210918 : 2 Es 1 As 0

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



5p 20210811 : 562
 5s 20210815 : 17 Es 16 As 1
 6p 20211024 : 58
 6s 20210918 : 2 Es 2 As 0

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



5p 20210811 : 525
 5s 20210816 : 19 Es 18 As 1
 6p 20211004 : 48
 6s 20210918 : 2 Es 2 As 0

サーキットブレーカ効果比較

- ワクチン接種0.8%/日
 - E1.0→Y:0.5, M:0.5
- サーキットブレーカーあり

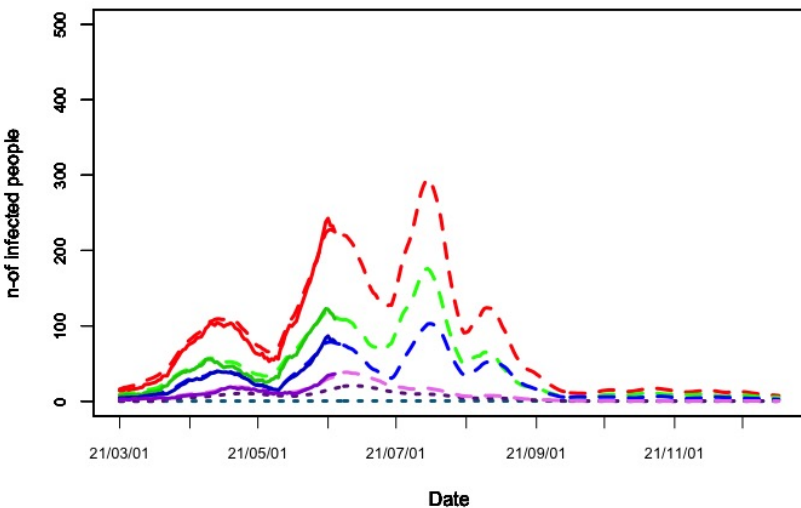
- 年代グループ
 - Y : 15歳～39歳
 - M : 40歳～64歳
 - E : 65歳～

CB開始200 解除100

CB開始150 解除50

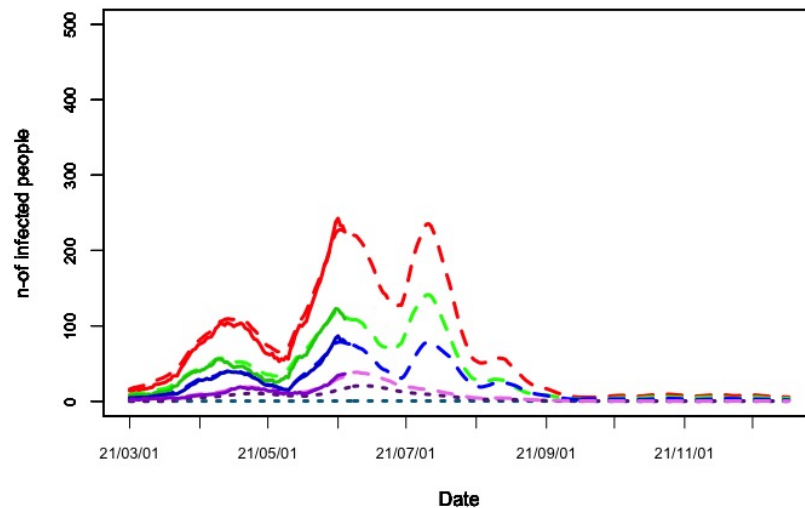
CB開始100 解除50

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



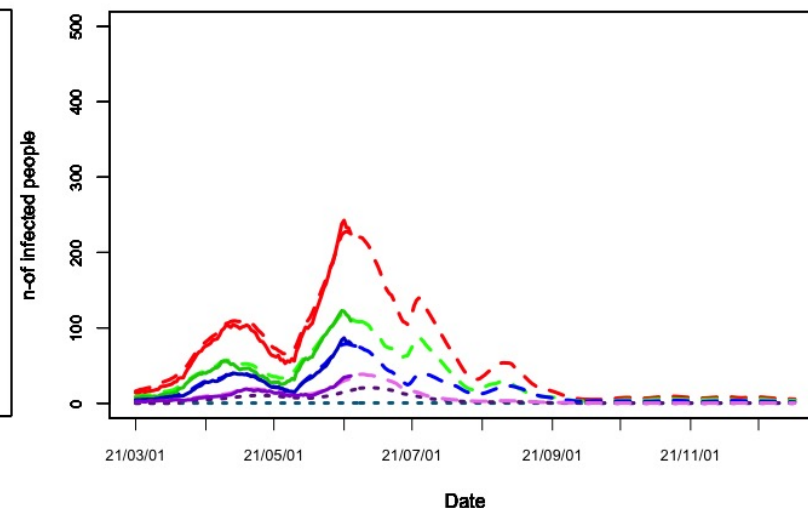
Ap 20210716 : 295
As 20210702 : 12 Es 12 As 0

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



Ap 20210712 : 235
As 20210702 : 12 Es 12 As 0

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



Ap 20210705 : 140
As 20210702 : 11 Es 11 As 0

サーキットブレーカー + 年代別接種効果比較

- ワクチン接種0.8%/日
- サーキットブレーカーあり

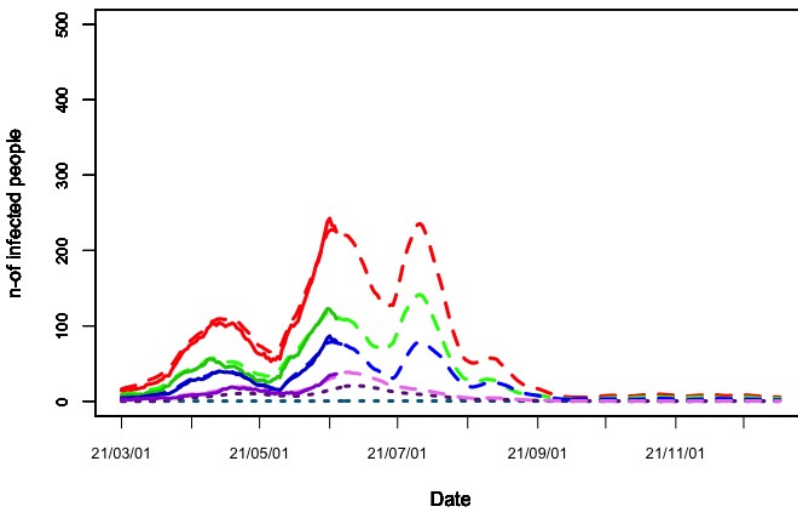
- 年代グループ
 - Y : 15歳~39歳
 - M : 40歳~64歳
 - E : 65歳~

CB開始150 解除50
E1.0→Y:0.5, M:0.5

CB開始150 解除50
E0.8→Y:0.2, M:0.8

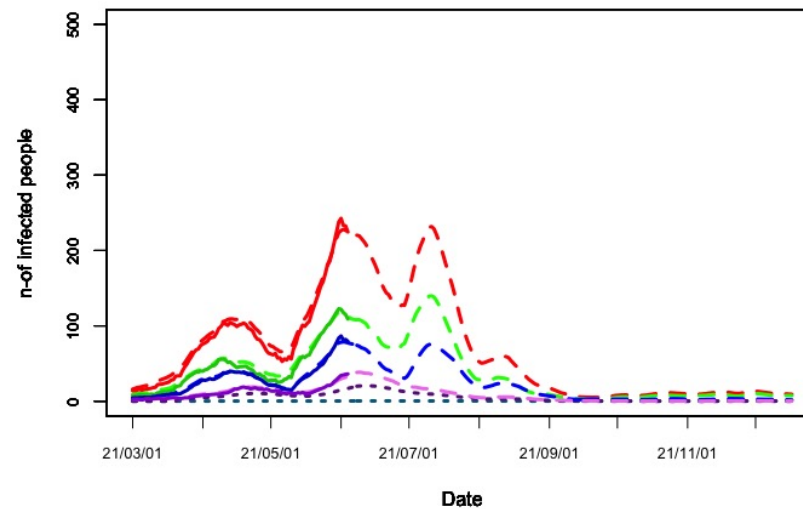
CB開始150 解除50
E0.8→Y:0.8, M:0.2

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



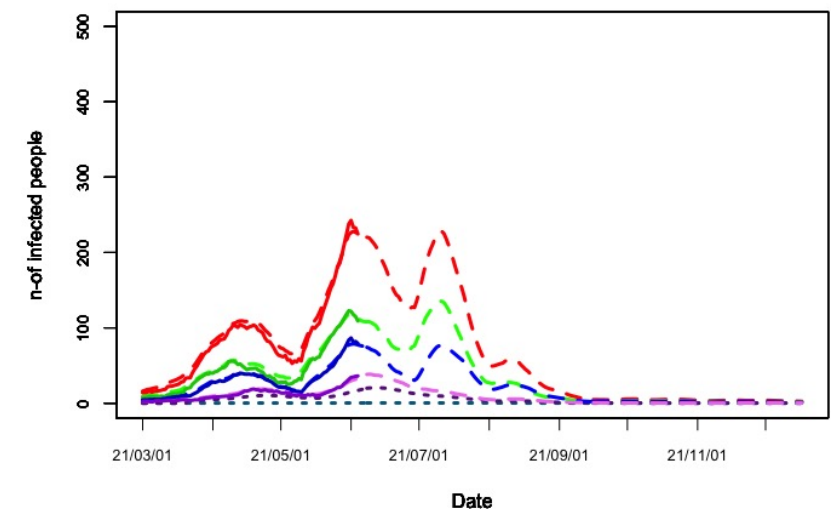
Ap 20210712 : 235
As 20210702 : 12 Es 12 As 0

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



Ap 20210712 : 232
As 20210702 : 12 Es 12 As 0

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



Ap 20210712 : 228
As 20210702 : 12 Es 12 As 0

サーキットブレーカー + 年代別接種効果比較

- ワクチン接種0.8%/日
- サーキットブレーカーあり

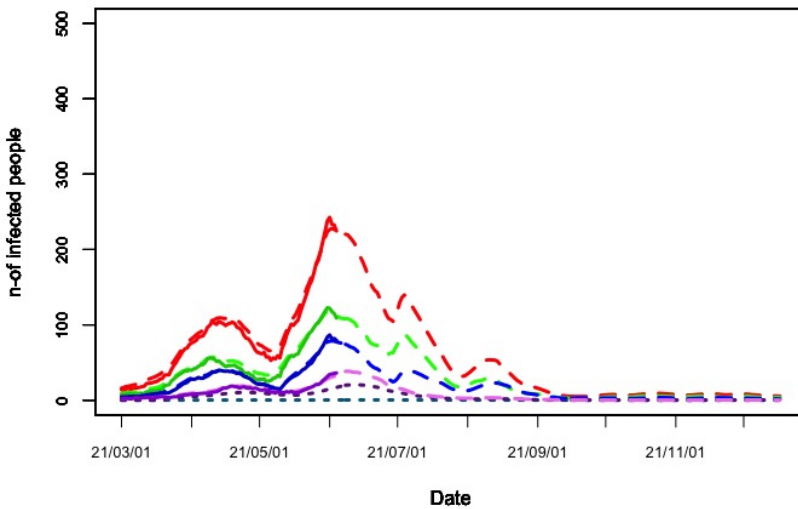
- 年代グループ
 - Y : 15歳~39歳
 - M : 40歳~64歳
 - E : 65歳~

CB開始100 解除50
E1.0→Y:0.5, M:0.5

CB開始100 解除50
E0.8→Y:0.2, M:0.8

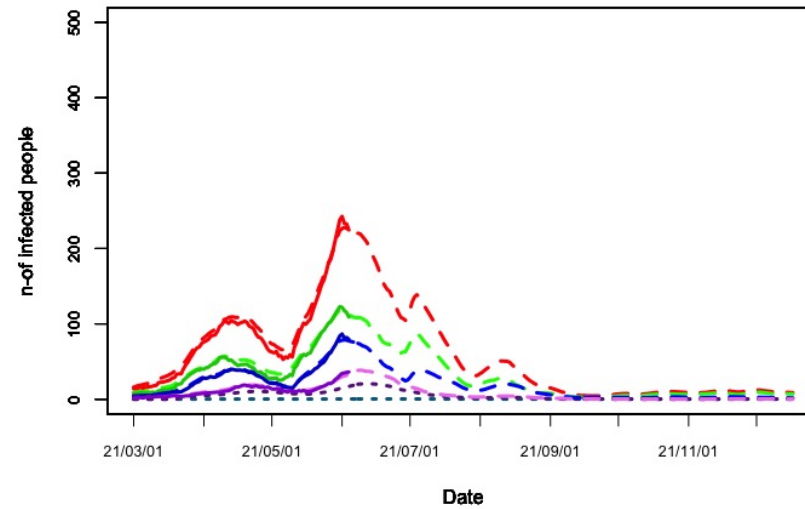
CB開始100 解除50
E0.8→Y:0.8, M:0.2

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



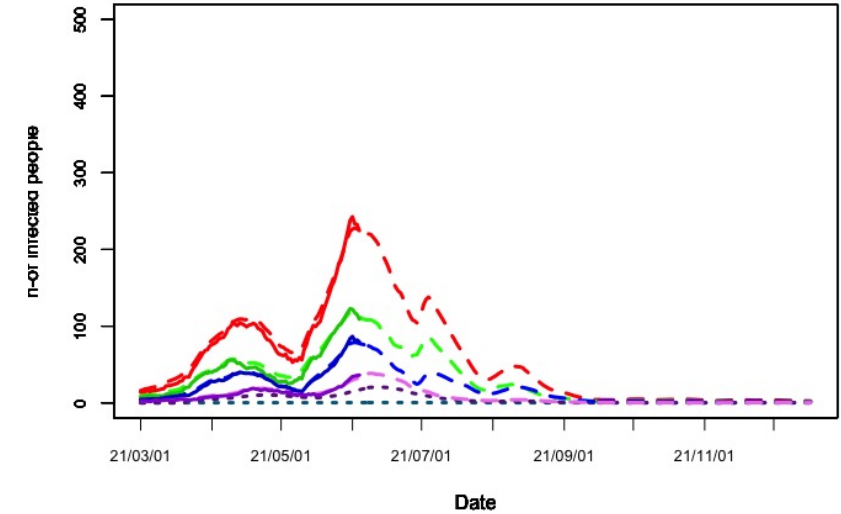
Ap 20210705 : 140
As 20210702 : 11 Es 11 As 0

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



Ap 20210705 : 139
As 20210702 : 11 Es 11 As 0

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



Ap 20210705 : 138
As 20210702 : 11 Es 11 As 0

モデル設定

1. SEIR数理モデルと最適化手法による感染モデル

人口流動を考慮したSEIRモデルとAI技術（進化的最適化+準ニュートン法）を用いて感染モデル推定の最適化を行うことで、0.6名/日の精度で15歳~39歳、40歳~59歳、65歳以上の3つの年代内および年代間での感染推定を行った。沖縄県外からの感染者流入者の推定値をモデルに組み込み、移動に伴う感染拡大現象を表現した。沖縄県の3月1日~6月5日の感染者数からモデルを学習させた、重症者数は、過去6ヶ月のデータから統計モデルを構築し、それぞれの年代の感染者数推移から推定した。

2. サーキットブレーカーの強度とワクチン接種効果を推定

沖縄県でのサーキットブレーカー（緊急事態宣言等）の強度を2021/8/5の第2次緊急事態宣言と同等に設定した。

3. ワクチン効果設定

- ワクチン効果は、第1回で57%、第2回で94%の発症予防効果があったとした
Noa Dagan, et al., BNT162b2 mRNA Covid-19 Vaccine in a Nationwide Mass Vaccination Setting, The New England Journal of Medicine, 2021
- 3/1 - 6/5 の実効再生産数・人口流動数の推移は実測値を使用。6/6以降は、春の感染が収束し始めた2021/4/15 - 6/10のRtを使用し、8/1以降は2020/8/1以降と同等と仮定。ピーク後の減少は、感染拡大に伴う外出自粛などの住民の行動変容に起因するとした
- ワクチン接種速度の設定
3/5以降人口の0.05%（医療従事者1回目実測数）
3/27日後 0.032%, 0.033%（医療従事者1回目, 2回目実測数）
4/12以降 0.069%, 0.030%（医療従事者1回目, 2回目実測数） 0.01%（高齢者1回目実測数）
5/4以降 0.064%, 0.078%（医療従事者1回目, 2回目実測数） 0.065%, 0.006%（高齢者1回目, 2回目実測数）
6/1以降 0.064%, 0.078%（医療従事者1回目, 2回目見込み） k/2%, 0.065%（高齢者1回目, 2回目見込み）
m/d以降 k/2%, k/2%（医療従事者1回目, 2回目見込み） k/2%, k/2%（高齢者1回目, 2回目見込み）
医療従事者2回目接種完了6/22, 高齢者2回目接種完了: k=0.5% 10/16, k=0.8% 9/2, k=1.1% 8/14

年代別ワクチン効果SEIRモデル

$$\begin{aligned}\frac{dS_i}{dt} &= mN_i - mS_i - \sum_{i'} \frac{b_{i,i',t} S_i (I_{i'} + in_risk_{i',t})}{N_i} - \sum_k \sigma_{i,k} \lambda_{i,k} N_i \\ \frac{dE_i}{dt} &= \sum_{i'} \frac{b_{i,i',t} S_i (I_{i'} + in_risk_{i',t})}{N_i} - (m + a)E_i \\ \frac{dI_i}{dt} &= aE_i - (m + g)I_i \\ \frac{dR_i}{dt} &= gI_i - mR_i + \sum_k \sigma_{i,k} \lambda_{i,k} N_i\end{aligned}$$

N_i = 年代 i の人口

S_i = 年代 i の免疫を持たない人の数

E_i = 年代 i の潜伏期間の人の数

I_i = 年代 i の発症者の数

R_i = 年代 i の回復者の数

t = 時間

m = 出生率=死亡率

$b_{i,i',t}$ = 時刻 t における年代 i, i' 間接触による感染率

a = 感染症の発症率

g = 感染症からの回復率

σ_k = k 回目の単位時間当たりのワクチン接種割合パラメータ

λ_k = k 回目のワクチンによる免疫獲得確率パラメータ

SEIR逆シミュレーションモデル

- 都内人口流動データを考慮したSEIRモデル

cp:感染者数, ur:スマホ利用率

$$flow_risk_t = \frac{\sum_{i=1}^j flow_{i,t} * cp_t * ur}{pop}$$

- 進化的探索アルゴリズムと準ニュートン法を組み合わせた最適化手法で、実効再生産数 R_t に基づいて変換した感染率 b を生成する \mathbf{a}, \mathbf{x} を逆シミュレーション法で推定

$$b_{i,j} = a_{i,j}(R_t^i x_1 - x_2)$$

$$\min \sum_{t=1}^{now} (pred_t(\mathbf{R}_t, \mathbf{a}, \mathbf{x}) - observ_t)^2$$

subject to.

$$x_1^i > 0$$

$$1 \geq a_{i,i} \geq 0$$

$$a_{i,i} + \sum_{j,i \neq j} a_{i,j} = 1$$

R_t^i = 実効再生産数

x_k = 感染率係数

$a_{i,j}$ = 年代間感染係数