

COVID-19変異種感染者推定（東京都）
ワクチン接種速度・サーキットブレー
カー強度の効果比較

2021.4.20

筑波大学大学院 倉橋節也

サマリー

1. 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

東京都での従来型，N501Y変異種，N501Y+E484K変異種（4/2時点で10名の変異種ウイルス感染者がいた場合）において，ワクチン接種0.5%/dayで，新規陽性者数1000人と500人でサーキットブレーカーを発出する効果を推定した．CB強度は，2020年4月の緊急事態宣言，2021年1月の緊急事態宣言のそれぞれで実施した．また，CBを解除する感染者数について，CB開始と同等，500人，100人の場合を推定した．

2. サーキットブレーカー解除時の感染者数が重要

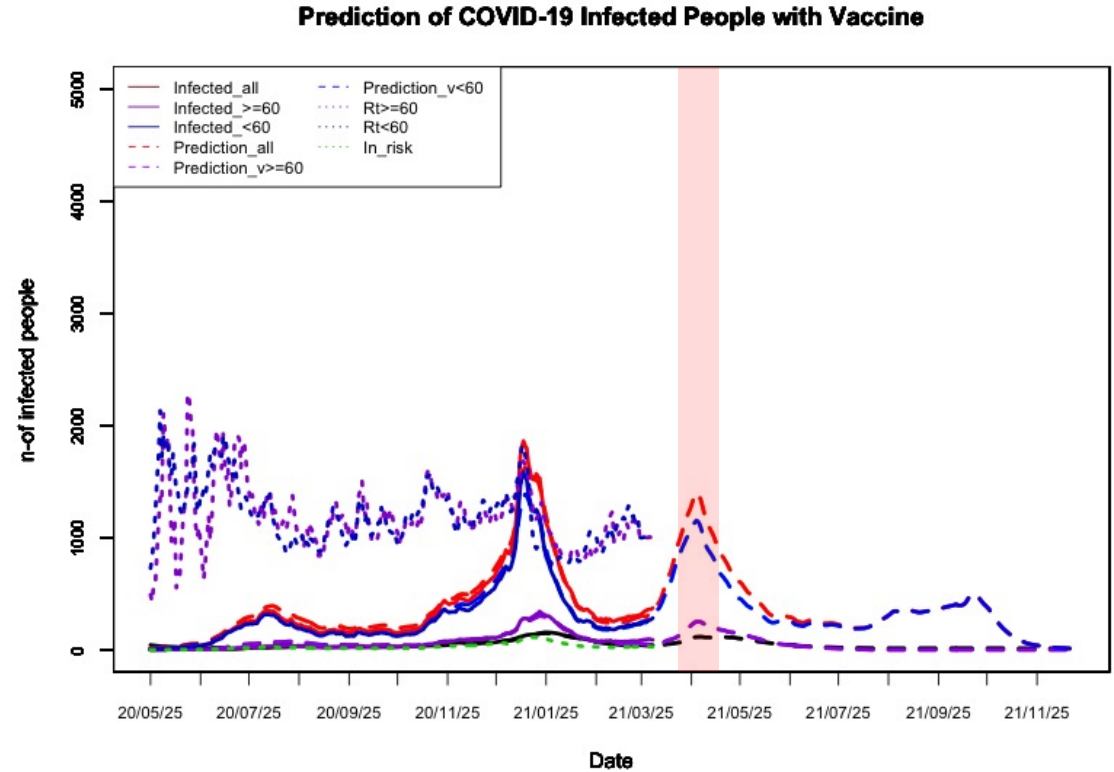
N501Y変異ウイルスで，新規感染者数が1000人でサーキットブレーカーを開始し500人で解除した場合，最大2000人規模の波が11月までに3回発生するが，新規感染者数が500人でサーキットブレーカーを開始し100人で解除した場合，最大800人規模の波が10月までに2回の発生に抑えられる可能性がある．

N501Y+E484K変異ウイルスでも，ほぼ同様の結果となった．

凡例 従来型ウイルスの例

2021年3月21日以降に昨年6月8日以降と同等の感染増加があったとして、東京都の感染者推移を年代別（60歳以上と59歳以下）でモデル化し、60歳以上に優先ワクチン接種とサーキットブレーカーを実施する効果を推定

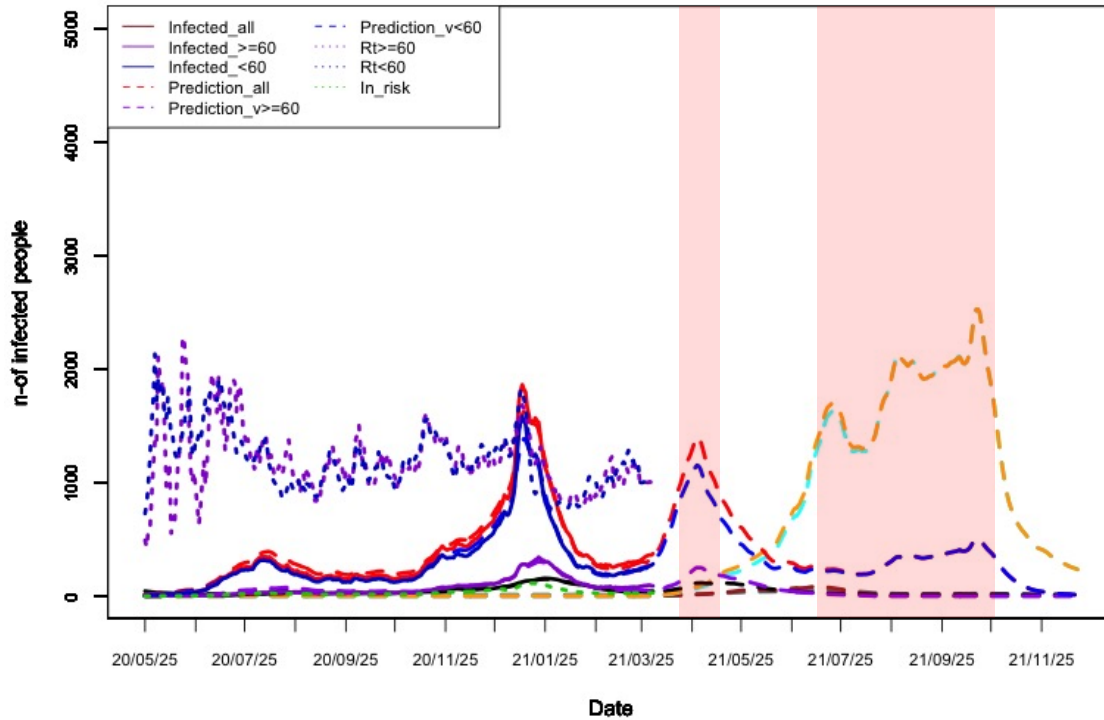
ウイルス：従来型
 ワクチン接種速度：0.5%/day
 CB：第2次緊急事態宣言相当 開始1000人-解除1000人
 4w 20210430 : 1403 第4波最大新規感染者数
 4wsv 20210503 : 116 第4波最大重症患者数
 5w 20211019 : 502 第5波最大新規感染者数
 5wsv 20210630 : 39 第5波最大重症患者数
 期間 4/23-5/13 CB期間



従来型 全感染者実測（赤実線） 予測（赤破線）
 60歳以上感染者実測（紫実線） 予測（紫破線）
 59歳以下感染者実測（青実線） 予測（青破線）
 重症者実測（黒実線） 予測（黒破線）
 変異型 全感染者予測（オレンジ破線）
 60歳以上感染者予測（茶破線）
 59歳以下感染者予測（シアン破線）
 重症者予測（グレイ破線）

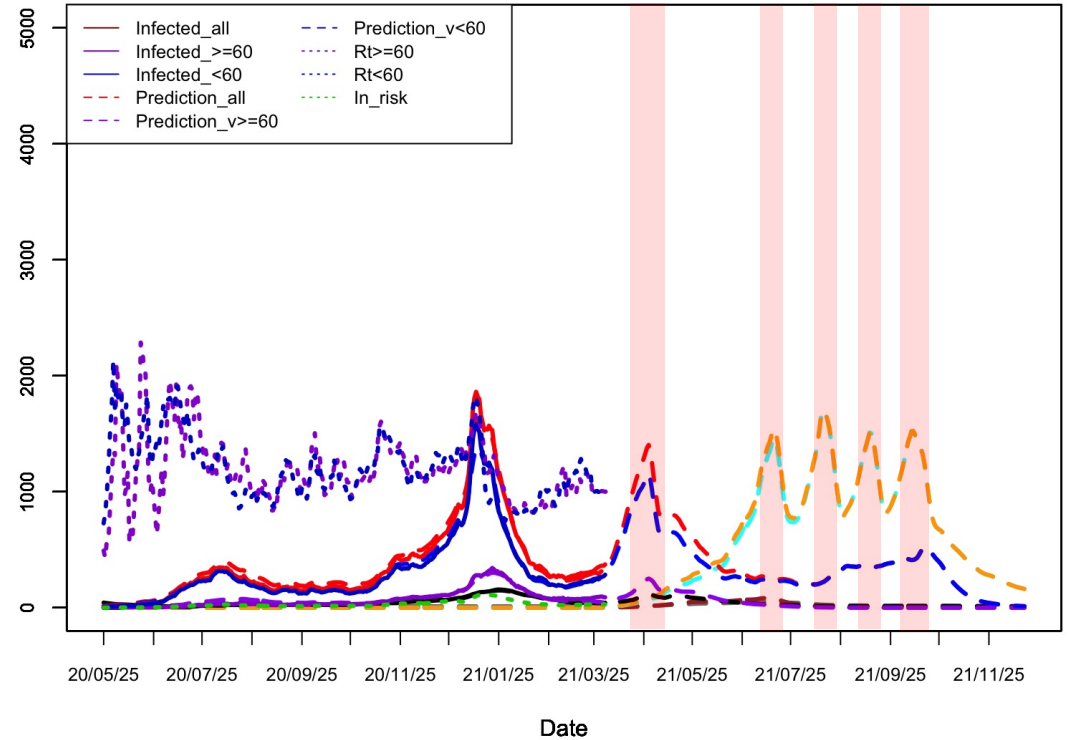
N501Y変異ウイルス, ワクチン0.5%/day

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB1000人 第2次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210503 : 116
 5w 20211019 : 2527
 5wsv 20210715 : 55
 期間 4/22-5/13, 7/8-11/6

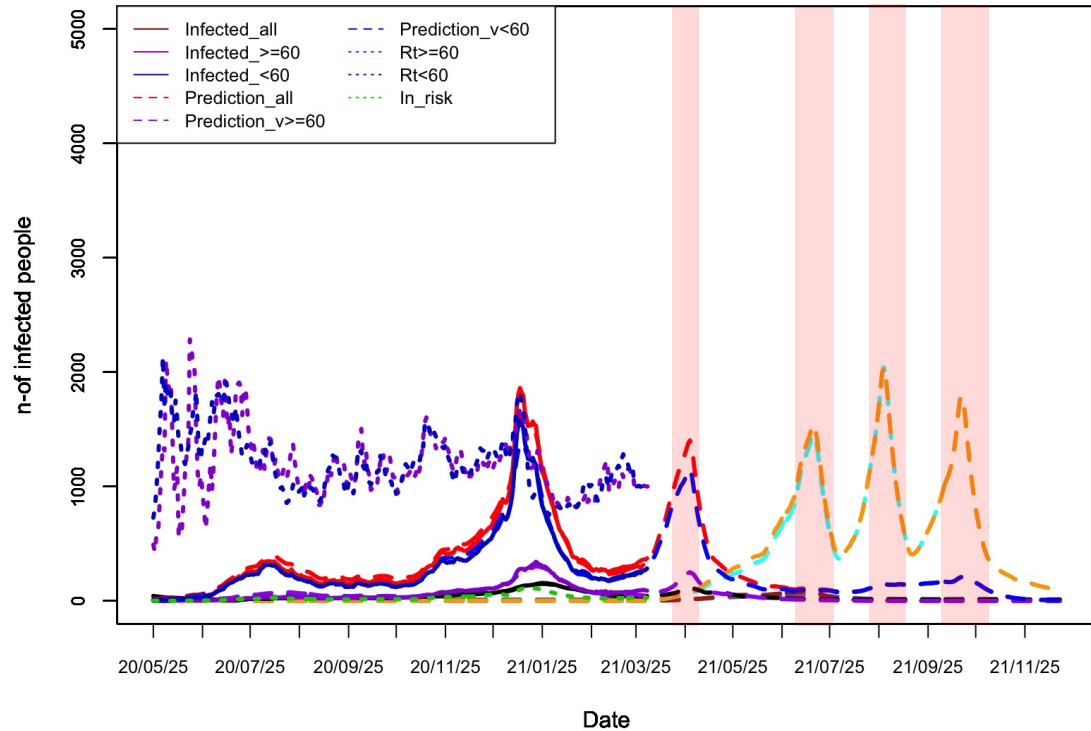
Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB1000人 第1次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210430 : 115
 5w 20210816 : 1702
 5wsv 20210715 : 55
 期間 4/22-5/6, 7/8-7/24, 8/7-8/27, 9/6-9/22, 10/2-10/22

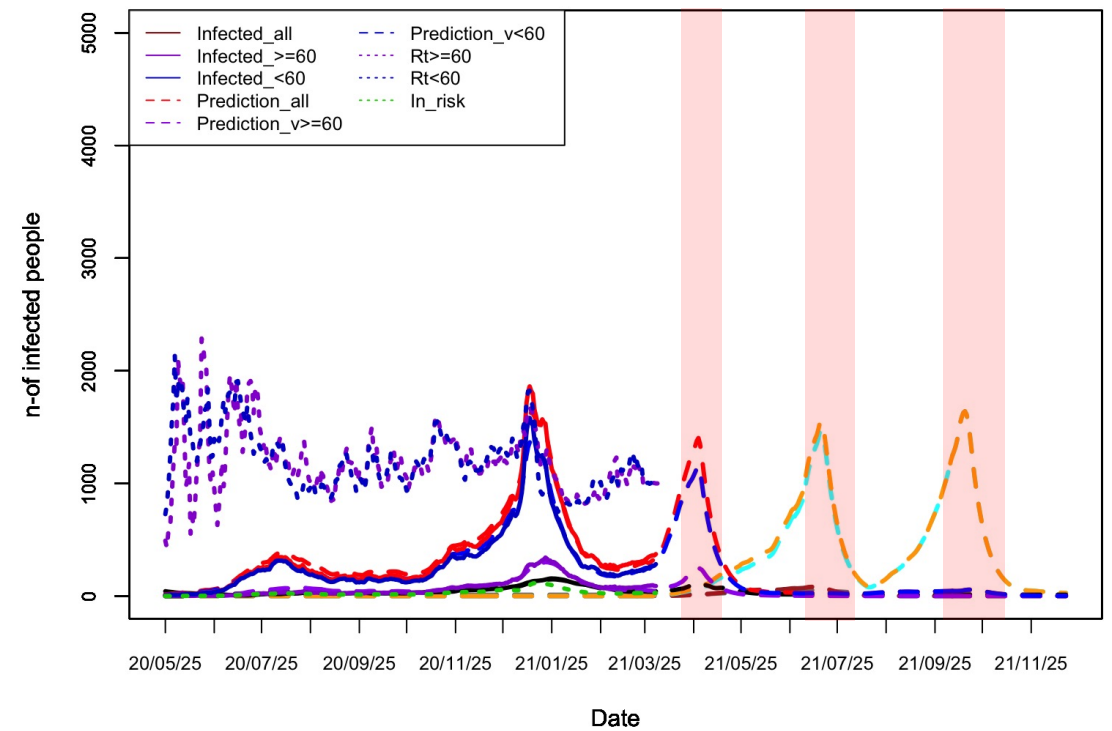
N501Y変異ウイルス, ワクチン0.5%/day, CB強化

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB1000人開始500人解除 第1次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210430 : 115
 5w 20210830 : 2043
 5wsv 20210715 : 55
 期間 4/22-5/6, 7/8-7/31, 8/21-9/15, 10/9-11/2

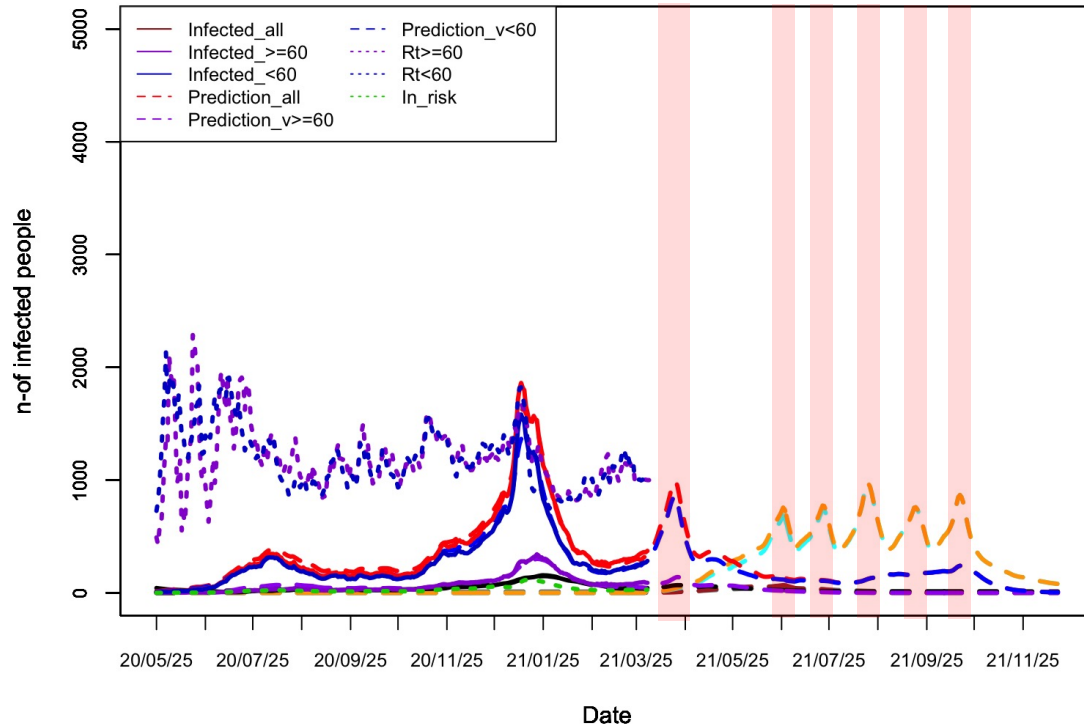
Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB1000人開始100人解除 第1次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210430 : 115
 5w 20211016 : 1641
 5wsv 20210715 : 55
 期間 4/22-5/6, 7/8-8/15, 10/5-11/15

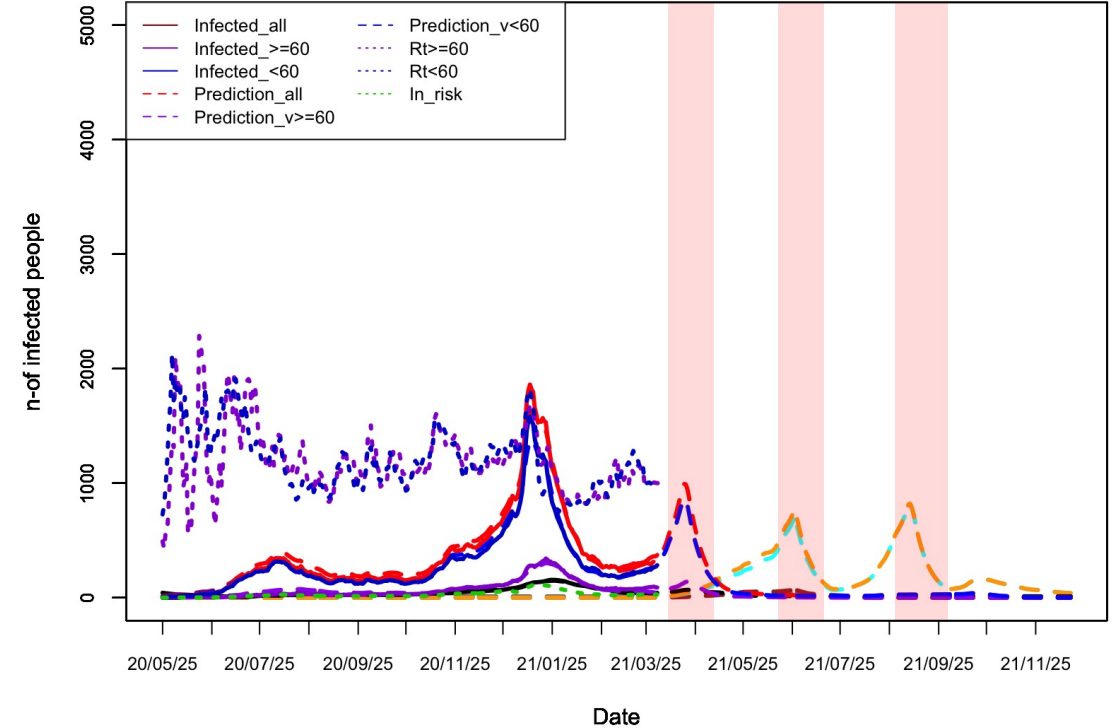
N501Y変異ウイルス, ワクチン0.5%/day, CB強化

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB500人開始500人解除 第1次宣言相当
 4w 20210420 : 993
 4wsv 20210422 : 68
 5w 20210820 : 971
 5wsv 20210630 : 44
 期間 4/12-4/30, 6/20-7/5, 7/15-7/31,
 8/11-8/31, 9/11-9/28, 10/9-10/26

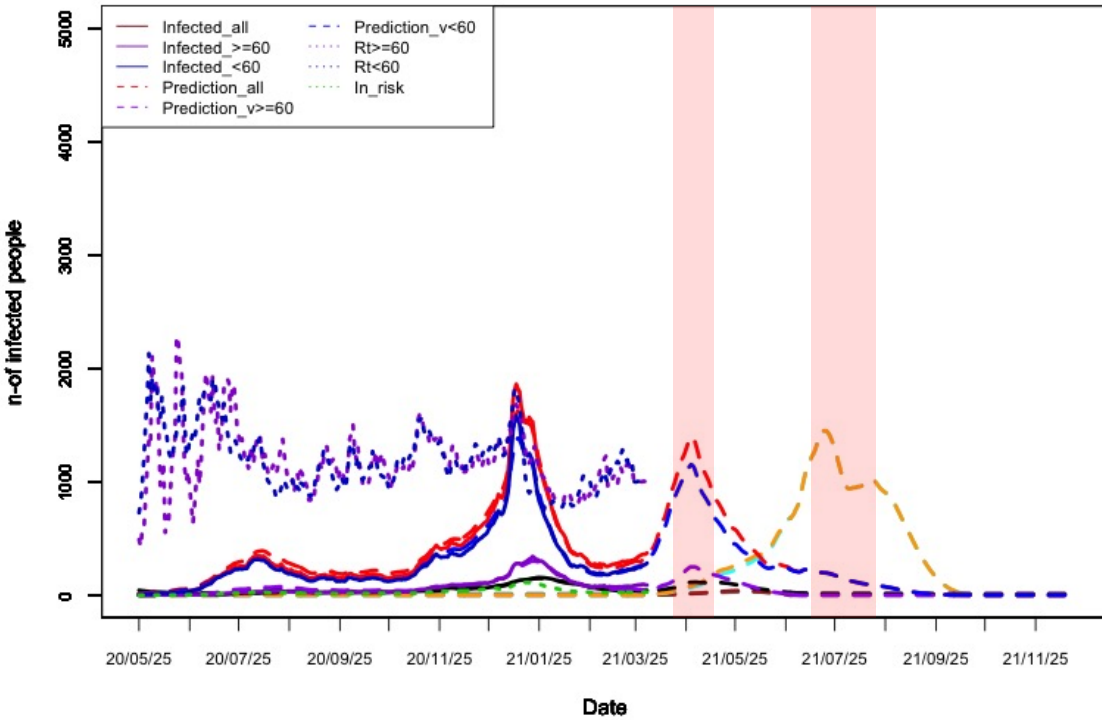
Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB500人開始100人解除 第1次宣言相当
 4w 20210420 : 993
 4wsv 20210422 : 68
 5w 20210909 : 821
 5wsv 20210630 : 44
 期間 4/12-5/16, 6/20-7/21, 8/31-10/2

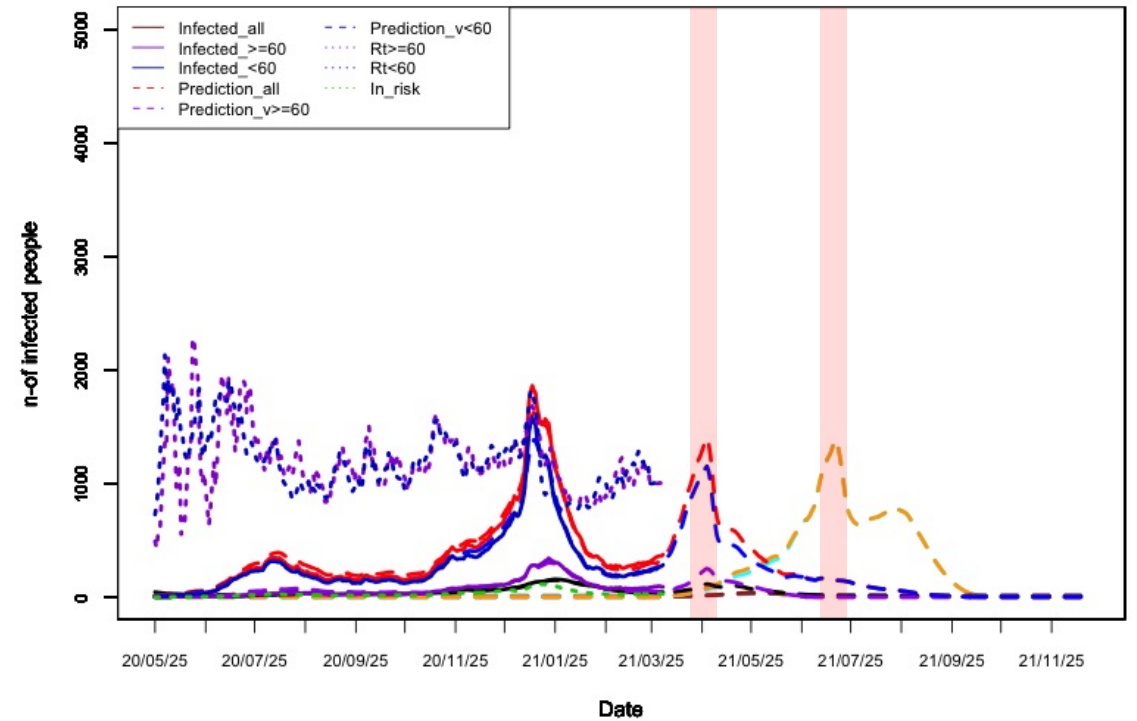
N501Y変異種ウイルス, ワクチン1.0%/day

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン1.0% CB1000人 第2次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210503 : 116
 5w 20210630 : 241
 5wsv 20210630 : 24
 期間 4/22-5/13, 7/8-8/22

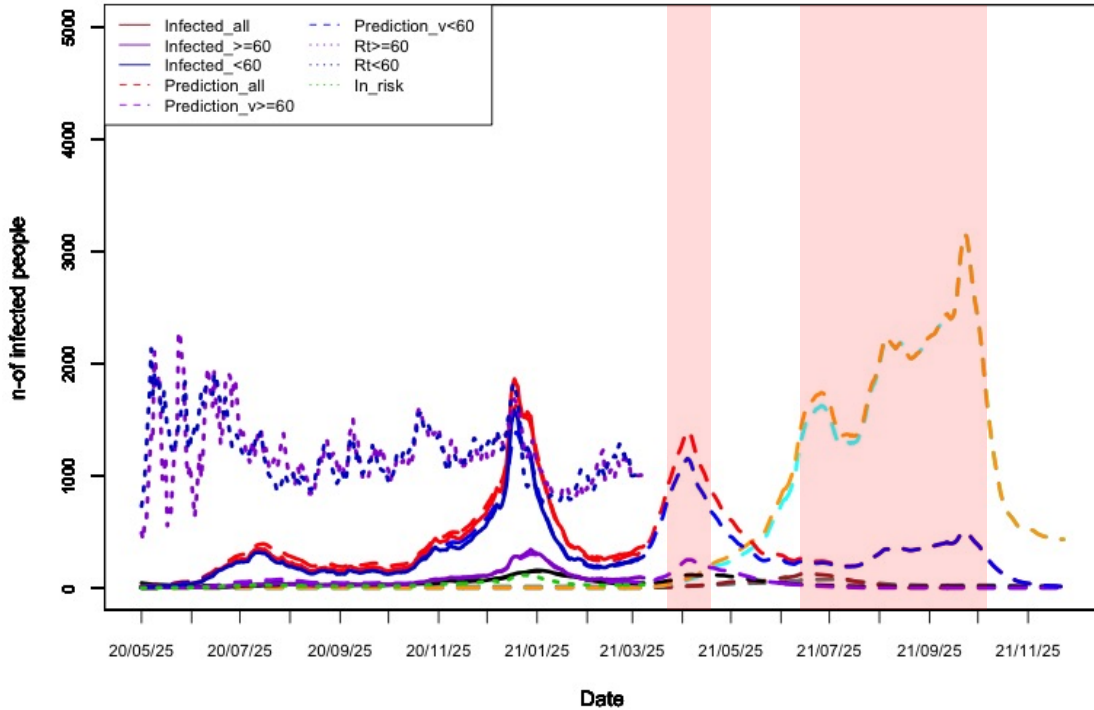
Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン1.0% CB1000人 第1次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210430 : 115
 5w 20210718 : 1381
 5wsv 20210630 : 19
 期間20210709 - 20210724

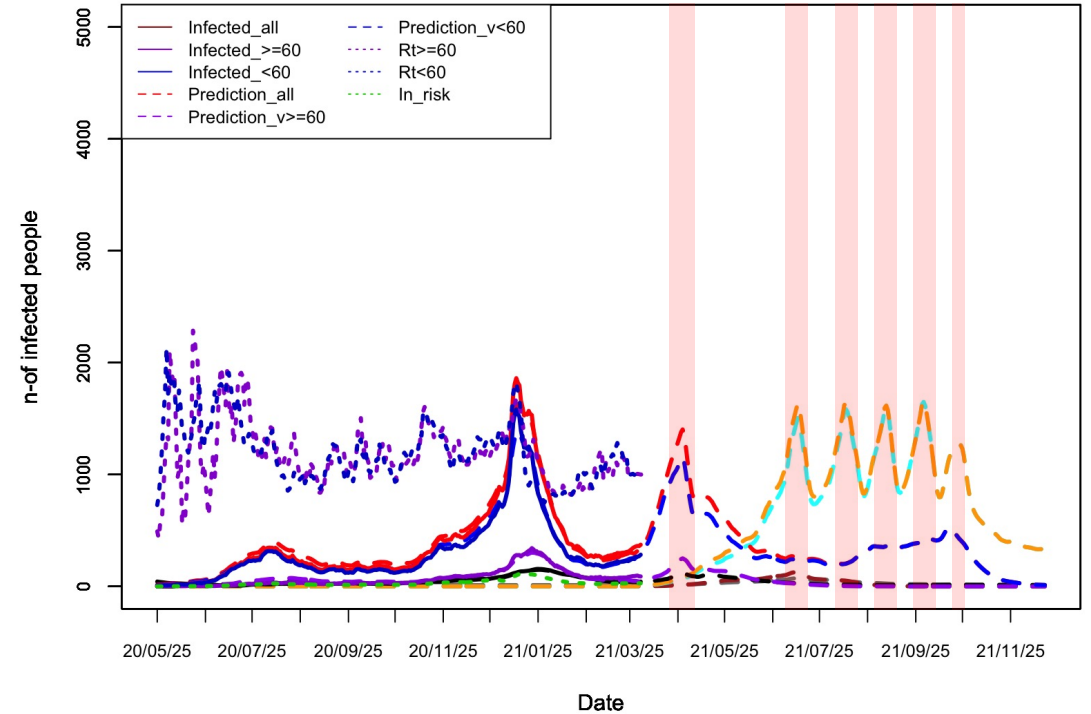
N501Y+E484K変異ウイルス, ワクチン0.5%/day

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB1000人 第2次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210503 : 116
 5w 20211019 : 3151
 5wsv 20210715 : 75
 期間 4/22-5/6, 7/5-11/10

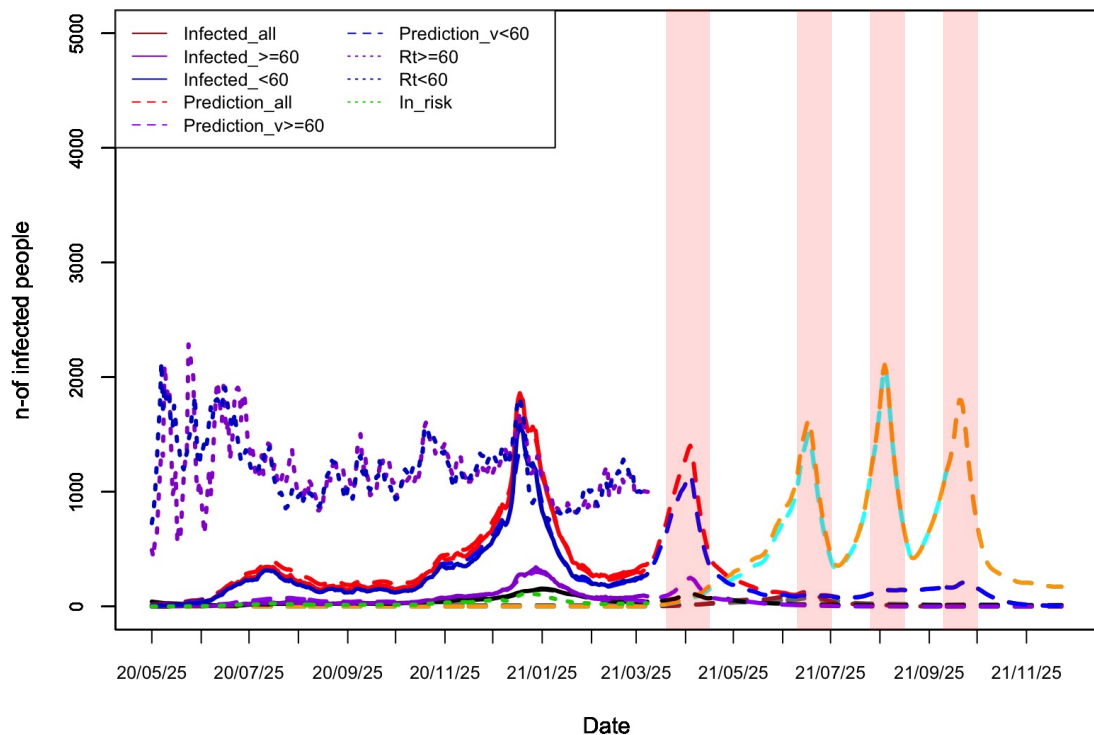
Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB1000人 第1次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210430 : 115
 5w 20211002 : 1649
 5wsv 20210713 : 74
 期間 4/22-5/6, 7/5-7/21, 8/4-8/23, 8/30-9/15, 9/23-10/11, 10/18-10/31

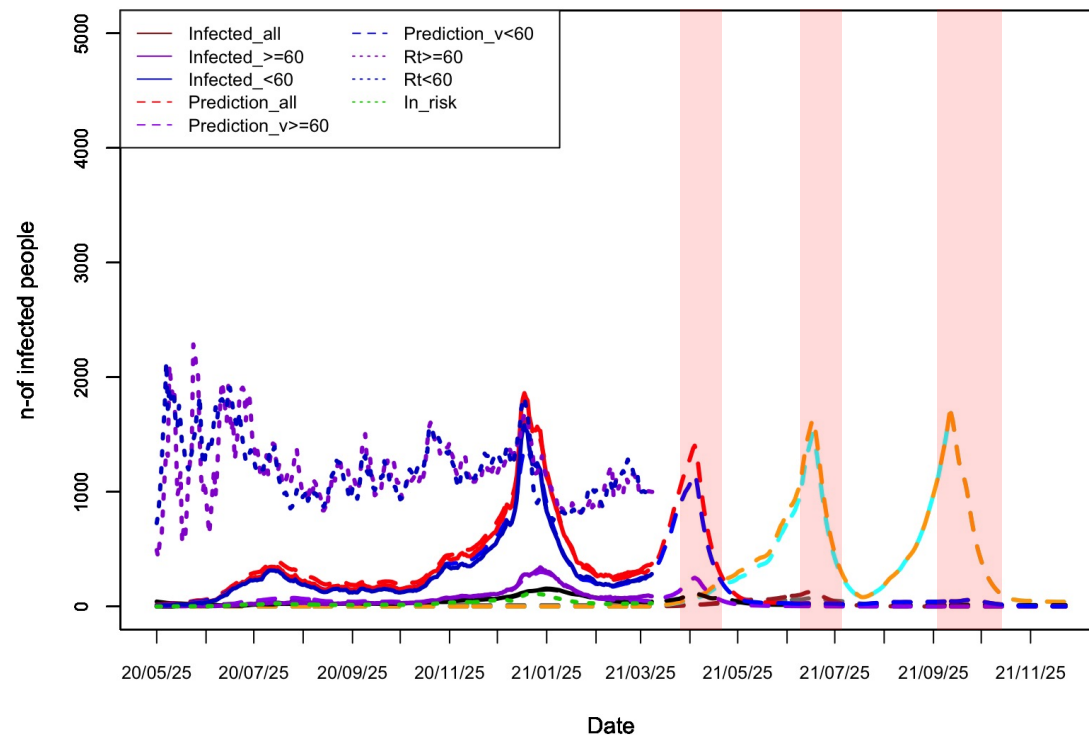
N501Y+E484K変異ウイルス, ワクチン0.5%/day, CB強化

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB1000人開始500人解除 第1次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210430 : 115
 5w 20210830 : 2108
 5wsv 20210713 : 74
 期間 4/22-5/12, 7/5-7/28, 8/21-9/15, 10/6-11/1

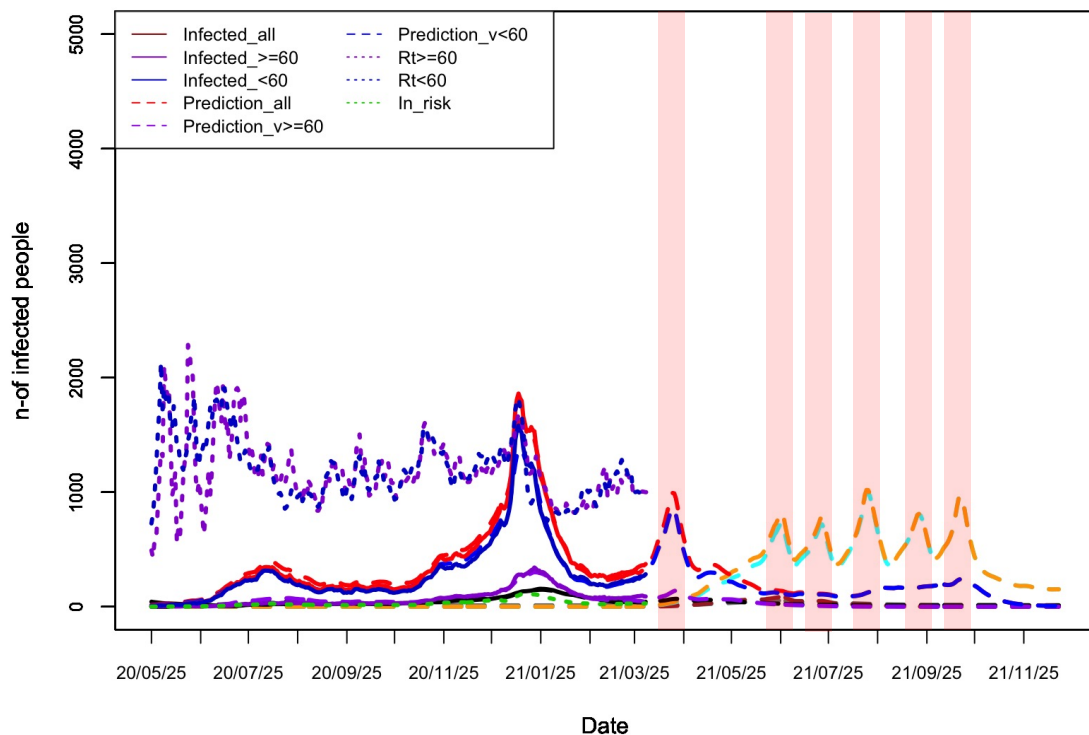
Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB1000人開始100人解除 第1次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210430 : 115
 5w 20211008 : 1686
 5wsv 20210713 : 74
 期間 4/22-5/12, 7/5-8/12, 9/29-11/11

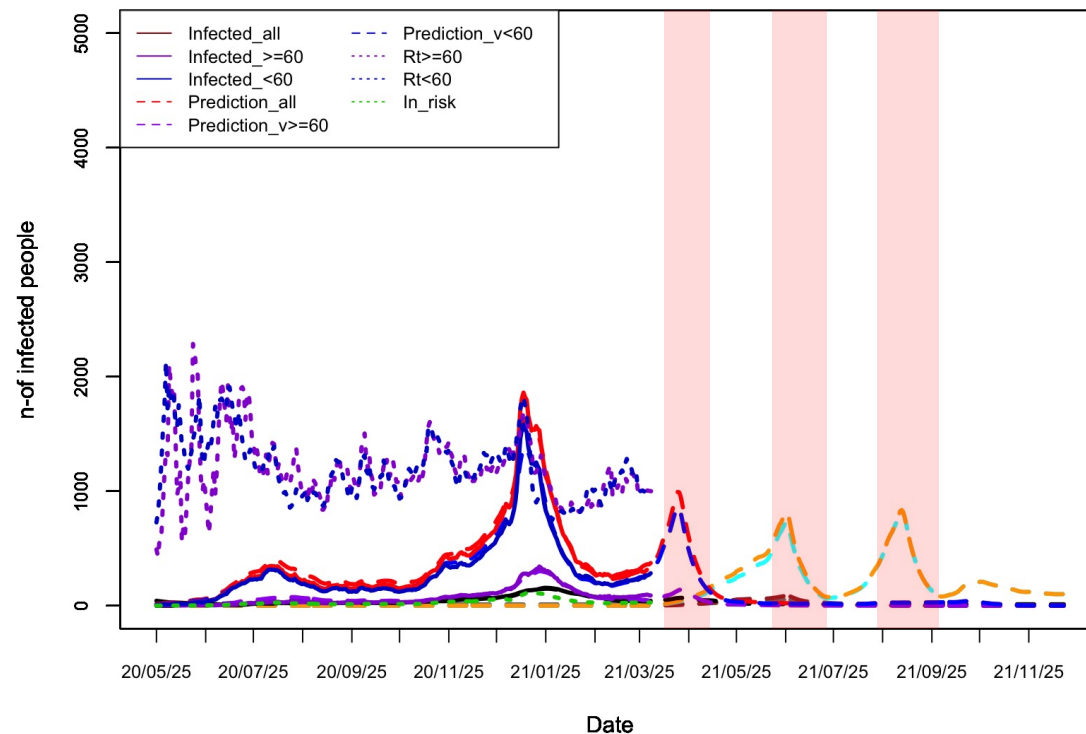
N501Y+E484K変異ウイルス, ワクチン0.5%/day, CB強化

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB500人開始500人解除 第1次宣言相当
 4w 20210420 : 993
 4wsv 20210422 : 68
 5w 20210820 : 1019
 5wsv 20210630 : 51
 期間 4/12-4/30, 6/19-7/5, 7/14-7/30, 8/11-9/1,
 9/13-9/30, 10/9-10/27

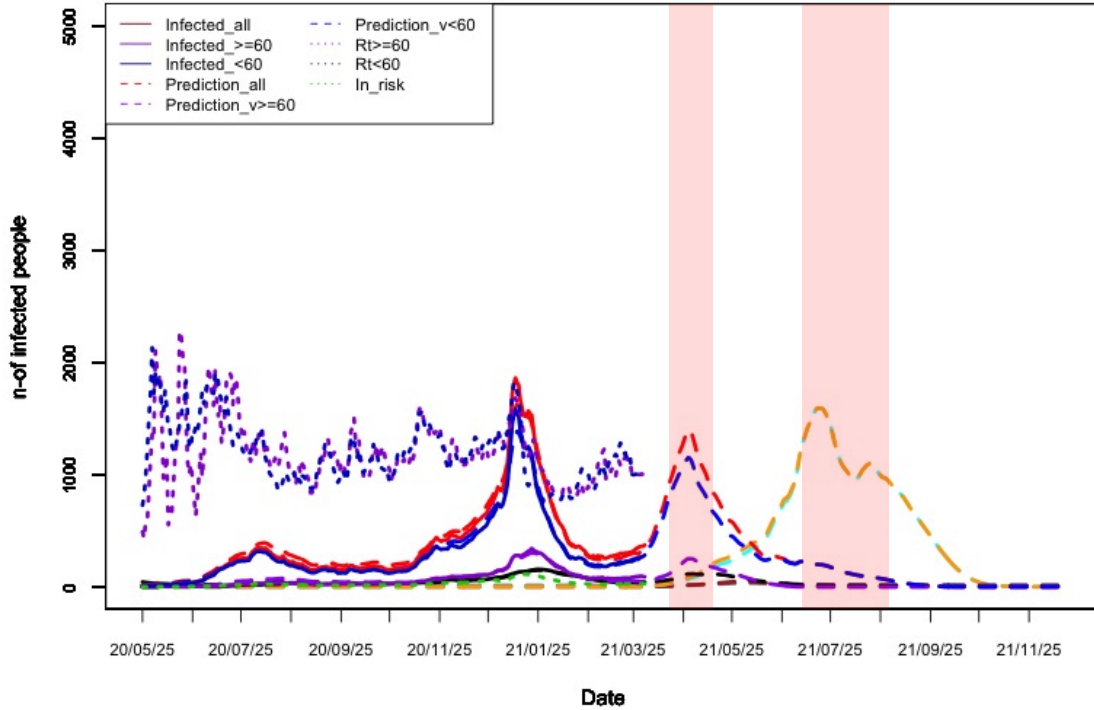
Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB500人開始100人解除 第1次宣言相当
 4w 20210420 : 993
 4wsv 20210422 : 68
 5w 20210908 : 836
 5wsv 20210630 : 51
 期間 4/12-5/16, 6/19-7/21, 8/30-10/1

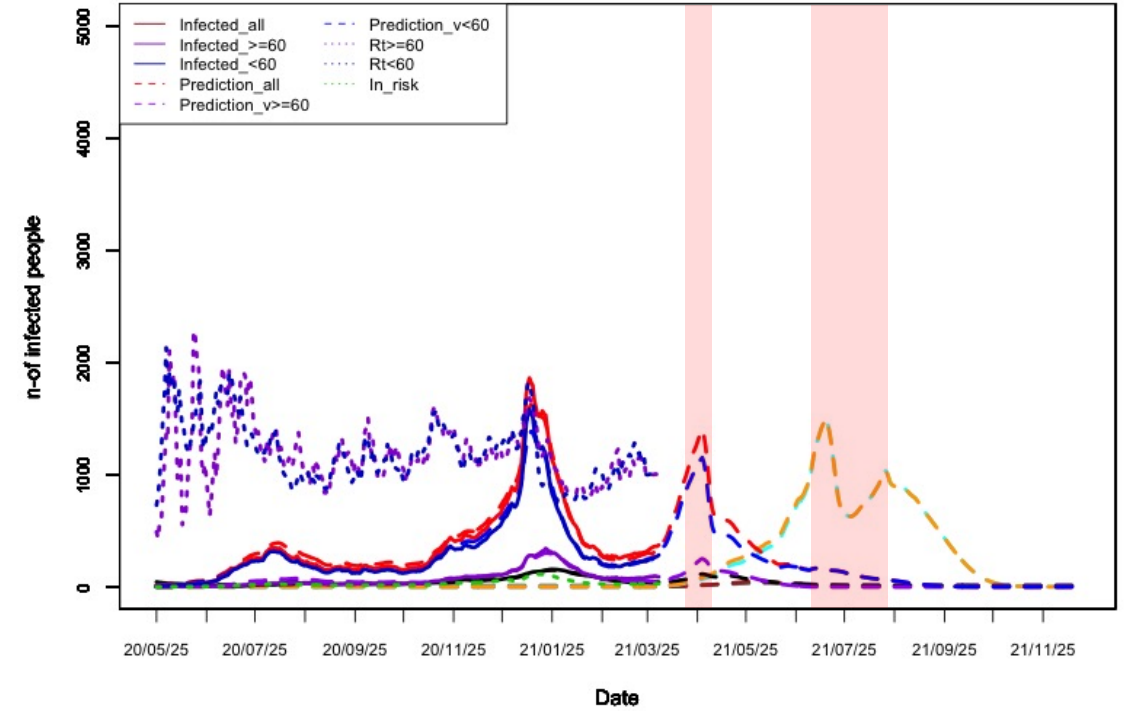
N501Y+E484K変異種ウイルス, ワクチン1.0%/day

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB1000人 第2次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210503 : 116
 5w 20210719 : 1594
 5wsv 20210630 : 29
 期間20210707 - 20210828

Prediction of COVID-19 Infected People with Vaccine



ワクチン0.5% CB1000人 第1次宣言相当
 4w 20210430 : 1403
 4wsv 20210430 : 115
 5w 20210715 : 1499
 5wsv 20210630 : 29
 期間20210707 - 20210824

モデル設定

1. 数理モデルとAIの融合による感染モデル

新型コロナウイルス感染症において、緊急事態宣言解除後の感染予測と、ワクチン接種の効果を予測した。予測期間は2021年3月から11月とし、人口流動を考慮したSEIRモデルとAI技術（進化的最適化）を用いて感染モデル推定の最適化を行うことで、2.6名/日の精度で60歳以上と59歳以下の2つの年代内および年代間での感染推定が可能となった。人口流動に伴う感染者流入リスクを一部考慮することで、市中感染者の滞留と加速度的な感染拡大現象が一定程度表現できるようになった。このモデルにおいて、昨年6月8日以降と同じ都民の行動変容（≒実効再生産数）があったとしてシミュレーションを実施した。

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

東京都での従来型、N501Y変異種、N501Y+E484K変異種（4/2時点で10名の変異種ウイルス感染者がいた場合）において、ワクチン接種0.5%/day, 1.0%/dayそれぞれで、新規陽性者数1000人でサーキットブレーカーを発出する強度を、2020年4月の緊急事態宣言、2021年1月の緊急事態宣言のそれぞれで実施した場合を推定した。

3. ワクチン効果設定

- N501Y変異は、実効再生産数を50%アップさせるとした
Investigation of novel SARS-CoV-2 variant Variant of Concern 202012/01 Technical briefing 5
- E484K変異は、ワクチンの免疫効果を20%ダウンさせるとした
Neutralizing Activity of BNT162b2-Elicited Serum, N Engl J Med 2021; 384:1466-1468
- 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るとした
Noa Dagan, et al., BNT162b2 mRNA Covid-19 Vaccine in a Nationwide Mass Vaccination Setting, The New England Journal of Medicine, 2021
- 3/21 英国型変異種感染者が10名東京にいると仮定
- 3/21解除後の実効再生産数・人口流動数の推移は2020年6月1日以降と同等と仮定
第4波および第5波でピーク後の減少は、感染拡大に伴う外出自粛などの住民の行動変容に起因
- 変異株は3/23から感染拡大が始まると仮定
- ワクチン接種速度（2案）
3/5以降人口の0.02%/日に1回目接種, 3/15以降 0.04%, 3/22以降 0.05%（実測数）
3/27日後0.05%/日（合計0.1% 1回目+2回目）
1) 0.3%/日：4/12以降0.15%/日に1回目接種, 21日後に0.15%/日（合計0.3%, 接種者率90%）
2) 0.5%/日：4/12以降0.25%/日に1回目接種, 21日後に0.25%/日（合計0.5%, 接種者率90%）

年代別SEIR逆シミュレーションモデル

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

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

- 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Rtに基づいて変換した感染率bを生成するa, xを逆シミュレーション法で推定

$$\begin{aligned} b_{i,j} &= a_{i,j}(R_t^i x_1 - x_2) \\ \min & \sum_{t=1}^{now} (pred_t(\mathbf{R}_t, \mathbf{a}, \mathbf{x}) - observ_t)^2 \\ \text{subject to.} & \\ & x_1^i > 0 \\ & 1 \geq a_{i,i} \geq 0 \\ & a_{i,i} + \sum_{j,i \neq j} a_{i,j} = 1 \\ & R_t^i = \text{実効再生産数} \\ & x_k = \text{感染率係数} \\ & a_{i,j} = \text{年代間感染係数} \end{aligned}$$