

人流増加・ブースター接種  
接種率・接種証明制限  
効果の推定（東京都）

2021.10.5

筑波大学 倉橋節也

# サマリー

- 東京都における繁華街夜間人流増加率・3回目接種の開始時期・接種証明制限のそれぞれに対して、新規陽性者数の比較を実施した。
- 人流制限がない場合、来年1月後半以降に急速な感染拡大が予想された。主な原因として、夜間人流の増加・ワクチン発症予防効果減衰・3回目接種の遅れが推定された。
- 3回目接種を医療従事者と高齢者に限定した場合、年明けの感染拡大が危惧されるが、3回目接種を全年代に実施することで、感染拡大は一定程度抑制できることが示唆された。
- 効果的な抑制策は以下の3点と思われる。
  - 12/1以降に接種後180日を経過した年代から順に、全年代に3回目接種を実施
  - 3回目接種と接種証明による職場・飲食店・イベントへの入場制限
  - 新規陽性者が1000人を超えた時点で人流制限（50%減少）

# 東京都繁華街\*21時滞留人口推移

\* 歌舞伎町,銀座コリドー通り,渋谷センター街  
上野仲町通り,新宿二丁目,池袋,六本木

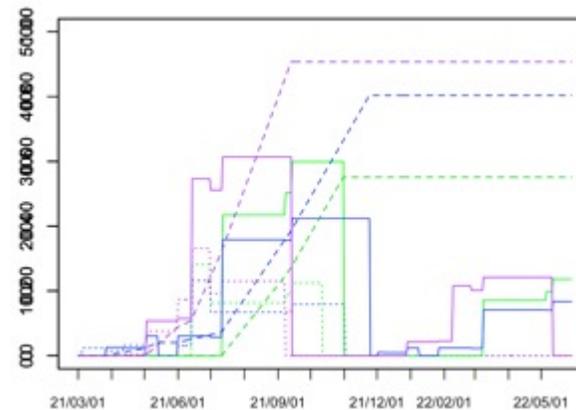
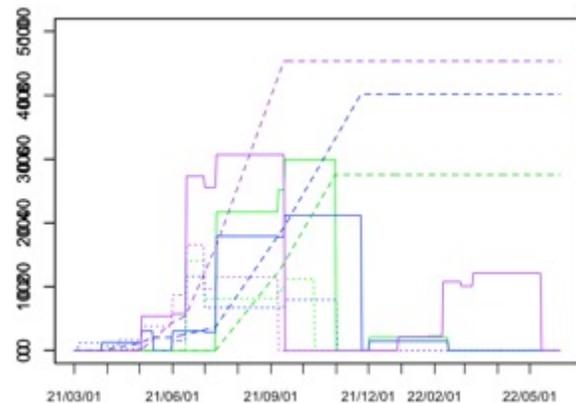
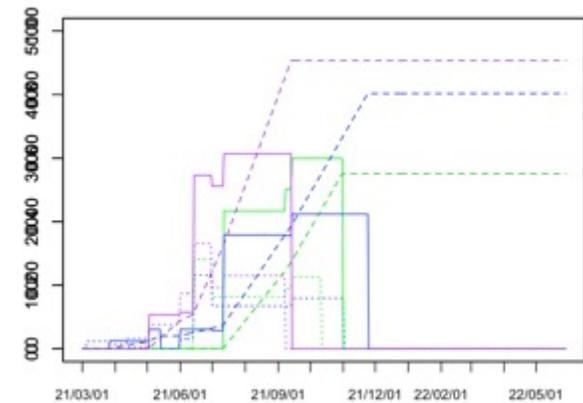


# ワクチン接種戦略

ワクチン2回接種

ワクチン3回接種（医療従事者・高齢者）  
12/1から8ヶ月経過者に対して接種

ワクチン3回接種（全年代）  
12/1から8ヶ月経過者に対して接種

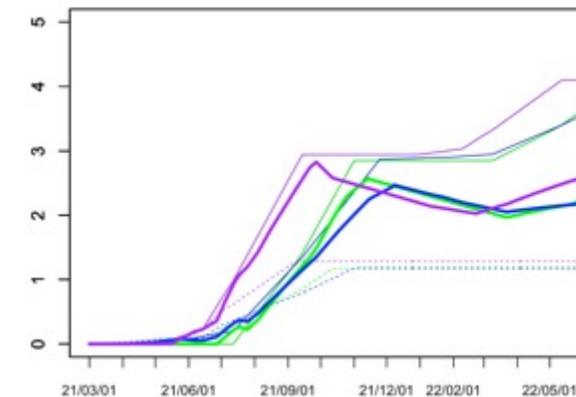
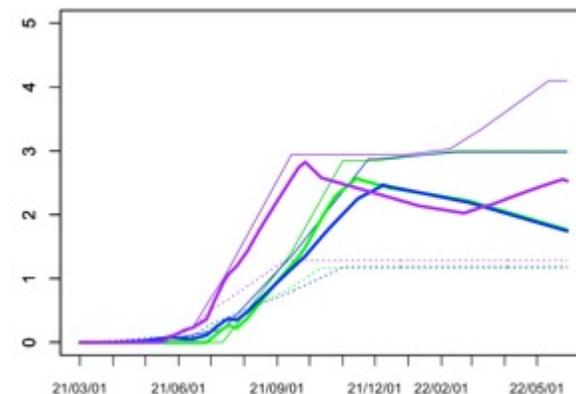
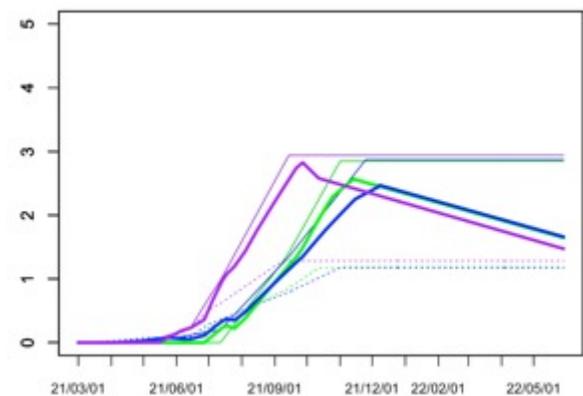


- 緑破線：0～39歳累計接種率
- 青破線：40～59歳累計接種率
- 紫破線：60歳以上累計接種率
- 緑点線：0～39歳1回目接種数
- 青点線：40～59歳 1回目接種数
- 紫点線：60歳以上1回目接種数
- 緑実線：0～39歳2回目接種数, 12/1以降3回目
- 青実線：40～59歳 2回目接種数, 12/1以降3回目
- 紫実線：60歳以上2回目接種数, 12/1以降3回目

年代別ワクチン接種数

年代別ワクチン接種数

年代別ワクチン接種数



- 緑点線：0～39歳1回目ワクチン効果
- 青点線：40～59歳 1回目ワクチン効果
- 紫点線：60歳以上1回目ワクチン効果
- 緑実線：0～39歳2回目以降ワクチン効果
- 青実線：40～59歳 2回目以降ワクチン効果
- 紫実線：60歳以上2回目以降ワクチン効果

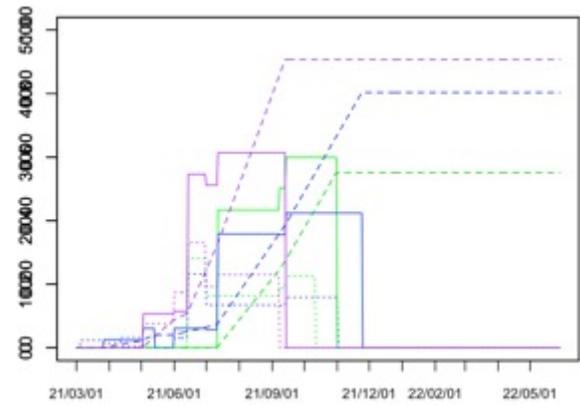
年代別ワクチン効果

年代別ワクチン効果

年代別ワクチン効果

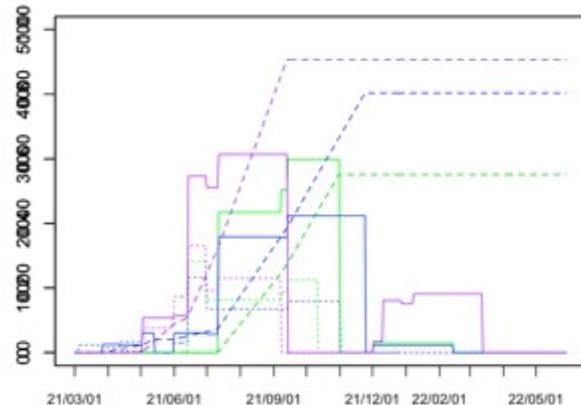
# ワクチン接種戦略

ワクチン2回接種



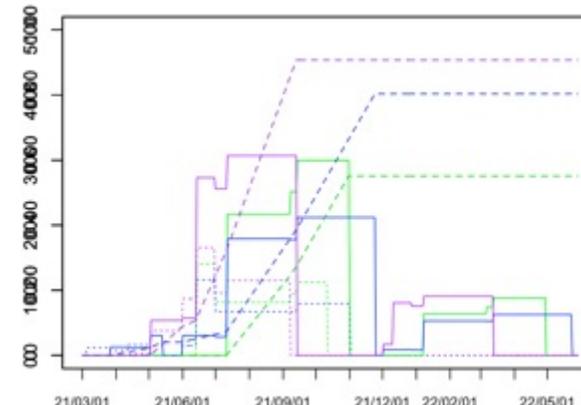
年代別ワクチン接種数

ワクチン3回接種（医療従事者・高齢者）  
12/1から6ヶ月経過者に対して接種



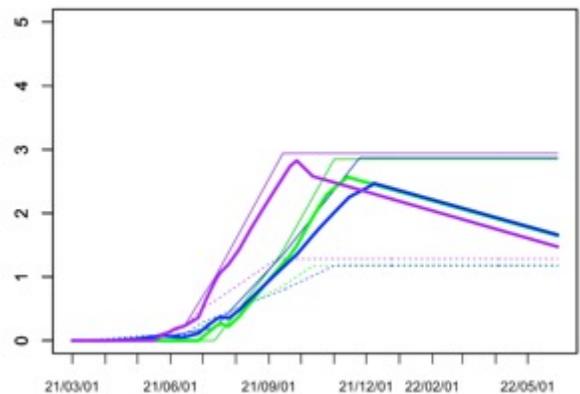
年代別ワクチン接種数

ワクチン3回接種（全年代）  
12/1から6ヶ月経過者に対して接種

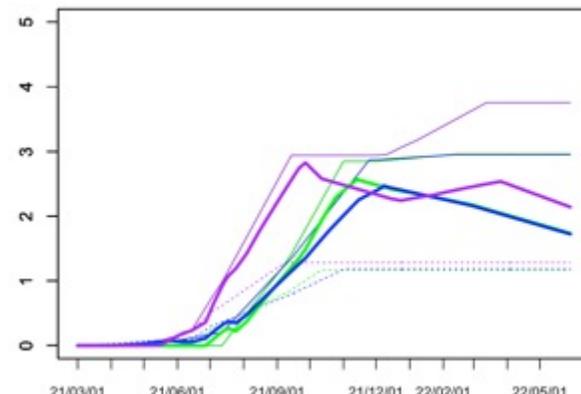


年代別ワクチン接種数

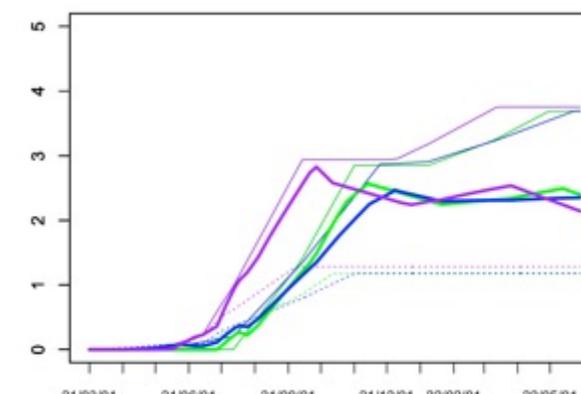
- 緑破線：0～39歳累計接種率
- 青破線：40～59歳累計接種率
- 紫破線：60歳以上累計接種率
- 緑点線：0～39歳1回目接種数
- 青点線：40～59歳1回目接種数
- 紫点線：60歳以上1回目接種数
- 緑実線：0～39歳2回目接種数, 12/1以降3回目
- 青実線：40～59歳2回目接種数, 12/1以降3回目
- 紫実線：60歳以上2回目接種数, 12/1以降3回目



年代別ワクチン効果



年代別ワクチン効果



年代別ワクチン効果

- 緑点線：0～39歳1回目ワクチン効果
- 青点線：40～59歳1回目ワクチン効果
- 紫点線：60歳以上1回目ワクチン効果
- 緑実線：0～39歳2回目以降ワクチン効果
- 青実線：40～59歳2回目以降ワクチン効果
- 紫実線：60歳以上2回目以降ワクチン効果

# 陽性者数比較

人流増加・3回目接種・接種証明制限による比較

# 3回目接種 医療従事者・高齢者

	1	2	3
夜間滞留人口*1	100%	100%	125%
3回目接種*2	医療,高齢	医療,高齢	医療,高齢
接種証明制限*3	0%	0%	0%
人流制限*4	0%	50%	50%

\*1 繁華街21時滞留人口の増加率 = (10/8以降)/(6/25-8/8期間平均)

\*2 ワクチン3回目接種 240日経過者に対して12/1から開始

\*3 ワクチン接種証明 or PCR/抗原検査陰性証明がない人の利用制限率

\*4 陽性者1000人で夜間滞留人口制限 (遅れ時間14日)

1回目効果,2回目効果 : 33%. 88%

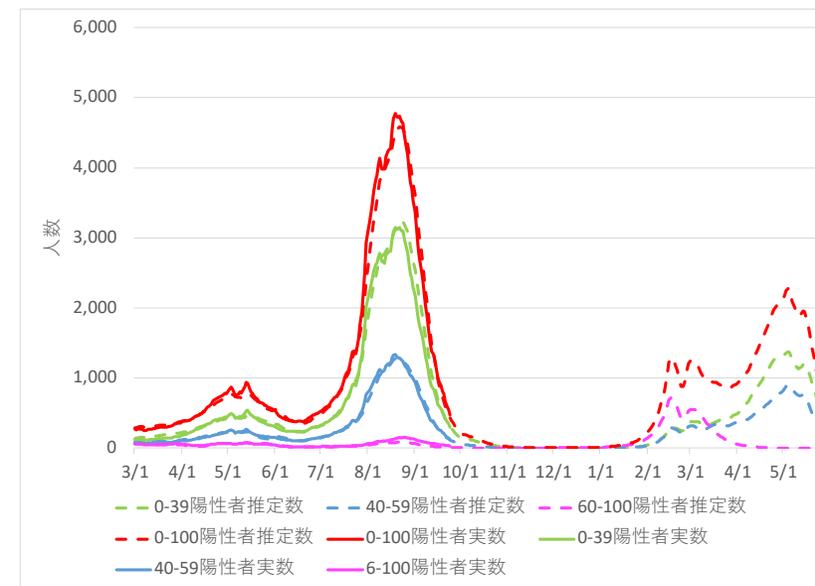
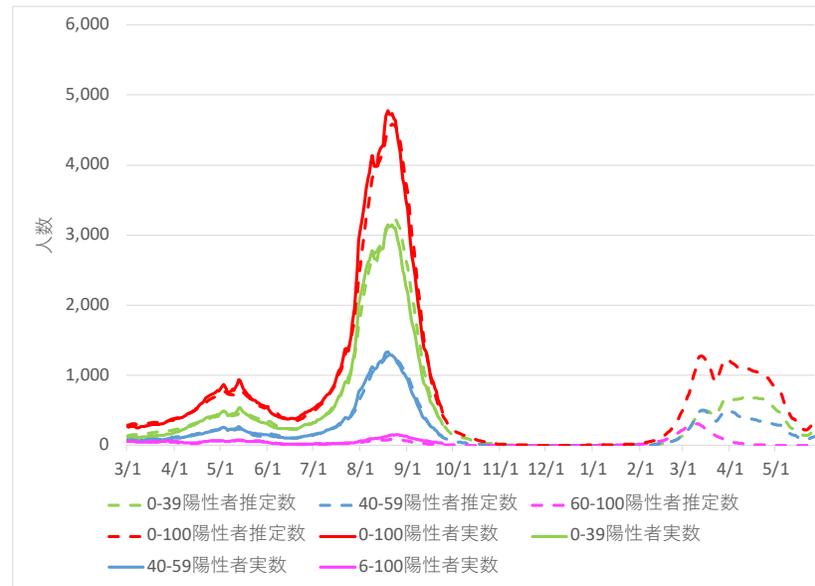
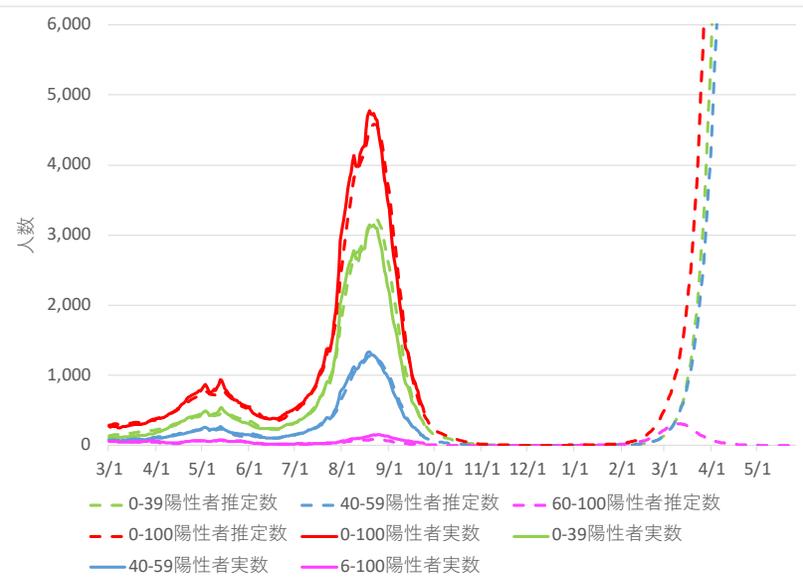
ワクチン2回目接種180日後発症予防効果 : 66%

ワクチン接種率 全人口(39歳以下,40-59歳,60歳以上) : 55%, 80%, 90%

1) 人流100%, 3回目医療高齢

2) 人流100%, 3回目医療高齢, CB人流50%

3) 人流125%, 3回目医療高齢, CB人流50%



感染者数22/1/1-4/30

2022/4/30

79,460

感染者数22/1/1-4/30

2022/3/13

1,277

感染者数22/1/1-4/30

2022/4/30

2,117

# 3回目接種 医療従事者・高齢者

	4	5
夜間滞留人口*1	150%	150%
3回目接種*2	医療,高齡	医療,高齡
接種証明制限*3	0%	80%
人流制限*4	0%	50%

\*1 繁華街21時滞留人口の増加率 = (10/8以降)/(6/25-8/8期間平均)

\*2 ワクチン3回目接種 240日経過者に対して12/1から開始

\*3 ワクチン接種証明 or PCR/抗原検査陰性証明がない人の利用制限率

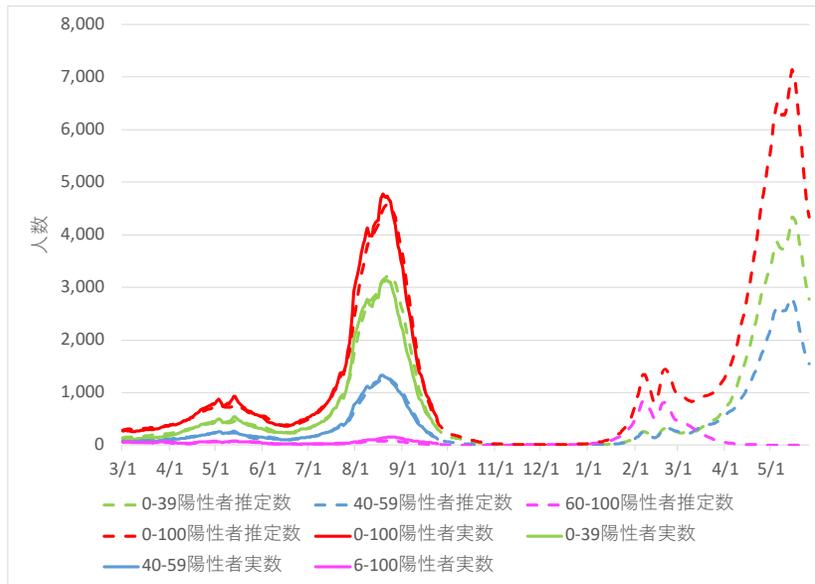
\*4 陽性者1000人で夜間滞留人口制限 (遅れ時間14日)

1回目効果,2回目効果 : 33%. 88%

ワクチン2回目接種180日後発症予防効果 : 66%

ワクチン接種率 全人口(39歳以下,40-59歳,60歳以上) : 55%, 80%, 90%

4) 人流150%, 3回目医療高齡, CB人流50%

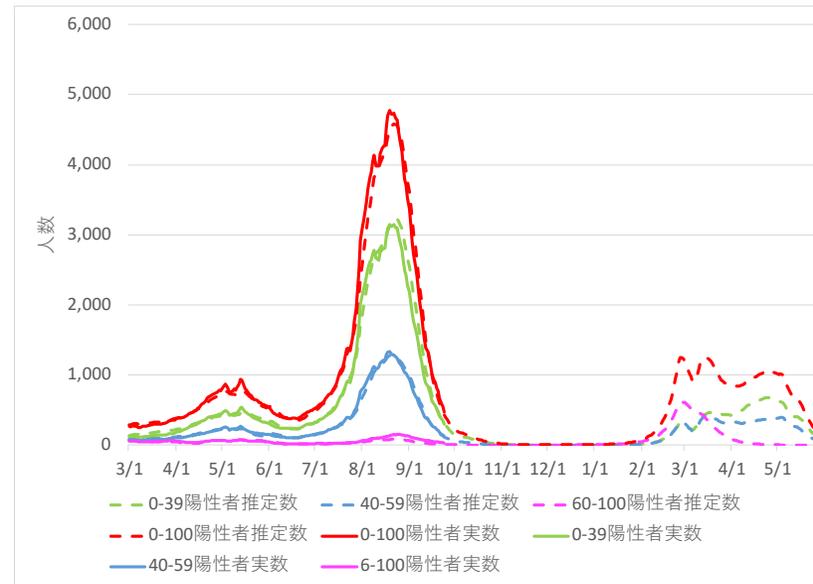


感染者数22/1/1-4/30

2022/4/30

5,473

5) 人流150%, 3回目医療高齡, CB人流50%, VP80%



感染者数22/1/1-4/30

2022/3/14

1,250

# 3回目接種 全年代

	1	2	3
夜間滞留人口*1	100%	100%	125%
3回目接種*2	全年代	全年代	全年代
接種証明制限*3	0%	0%	0%
人流制限*4	0%	50%	50%

\*1 繁華街21時滞留人口の増加率 = (10/8以降)/(6/25-8/8期間平均)

\*2 ワクチン3回目接種 240日経過者に対して12/1から開始

\*3 ワクチン接種証明 or PCR/抗原検査陰性証明がない人の利用制限率

\*4 陽性者1000人で夜間滞留人口制限 (遅れ時間14日)

1回目効果,2回目効果 : 33%. 88%

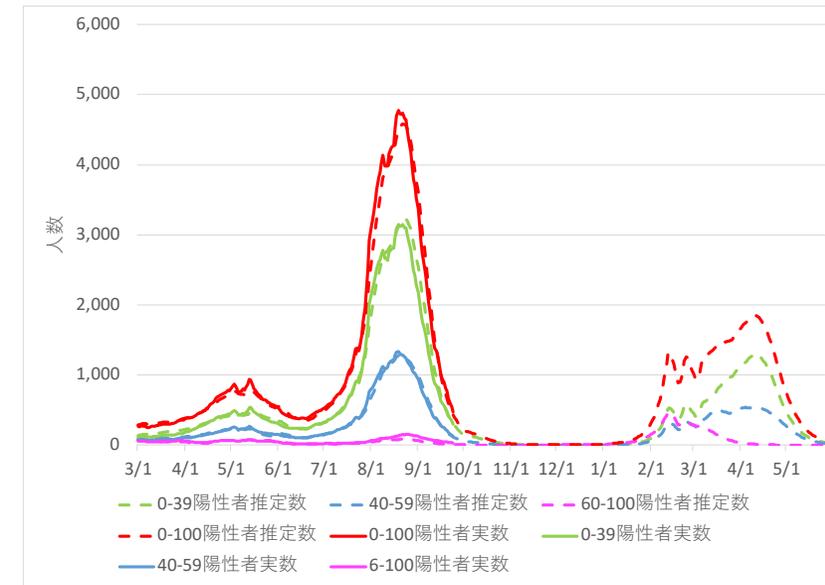
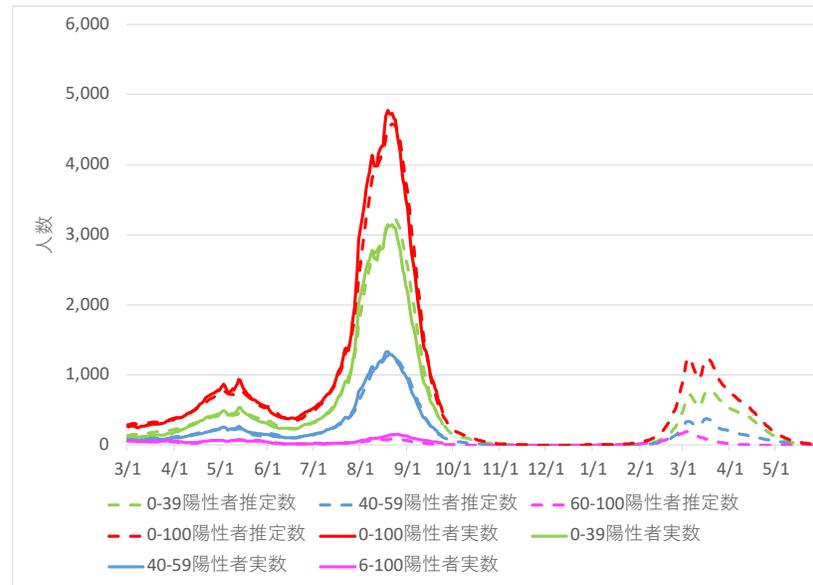
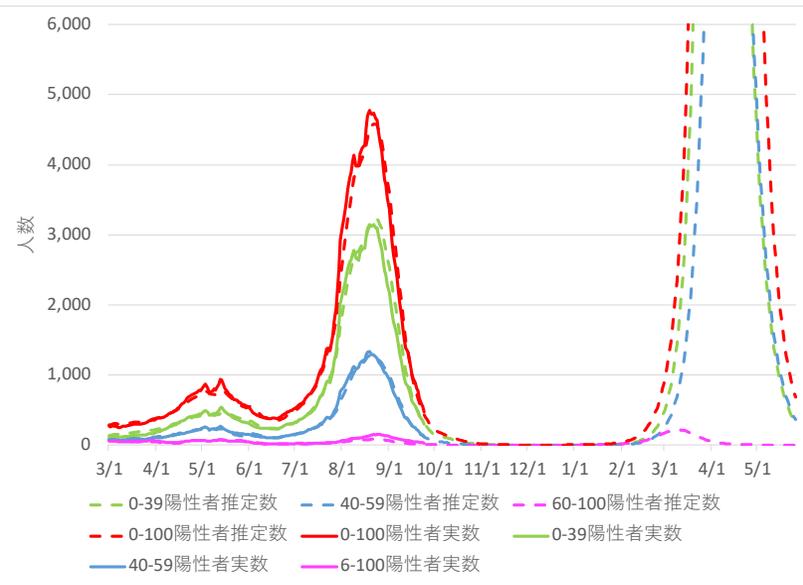
ワクチン2回目接種180日後発症予防効果 : 66%

ワクチン接種率 全人口(39歳以下,40-59歳,60歳以上) : 55%, 80%, 90%

1) 人流100%, 3回目全年代

2) 人流100%, 3回目全年代, CB人流50%

3) 人流125%, 3回目全年代, CB人流50%



感染者数22/1/1-4/30

2022/4/8

37,794

感染者数22/1/1-4/30

2022/3/5

1,248

感染者数22/1/1-4/30

2022/4/11

1,850

# 3回目接種 全年代

	4	5
夜間滞留人口*1	150%	150%
3回目接種*2	全年代	全年代
接種証明制限*3	0%	80%
人流制限*4	0%	50%

\*1 繁華街21時滞留人口の増加率 = (10/8以降)/(6/25-8/8期間平均)

\*2 ワクチン3回目接種 240日経過者に対して12/1から開始

\*3 ワクチン接種証明 or PCR/抗原検査陰性証明がない人の利用制限率

\*4 陽性者1000人で夜間滞留人口制限 (遅れ時間14日)

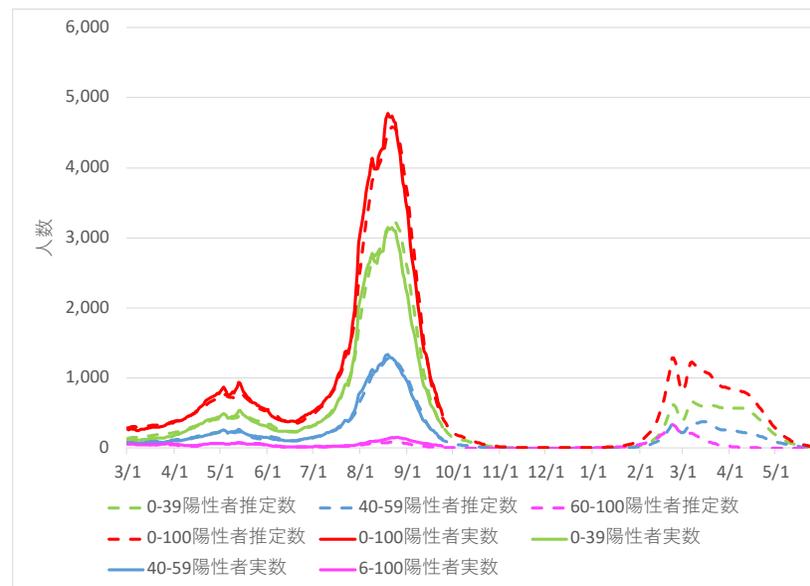
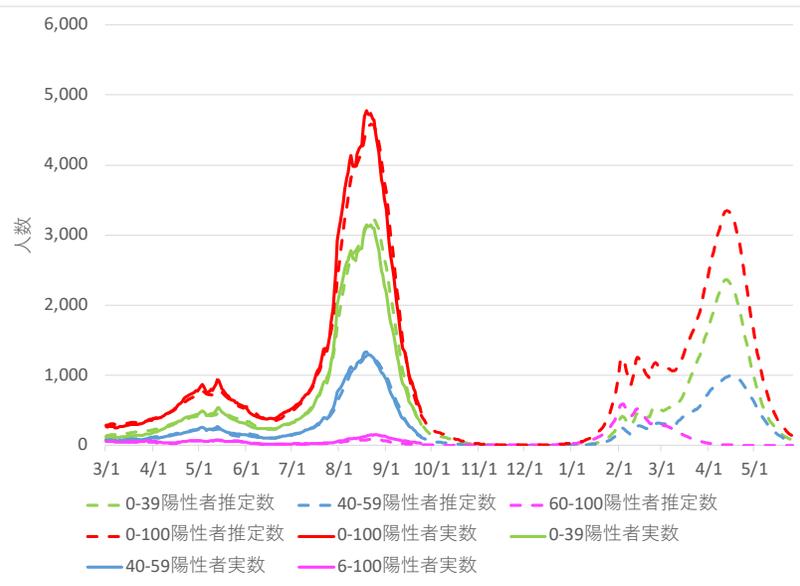
1回目効果,2回目効果 : 33%. 88%

ワクチン2回目接種180日後発症予防効果 : 66%

ワクチン接種率 全人口(39歳以下,40-59歳,60歳以上) : 55%, 80%, 90%

4) 人流150%, 3回目全年代, CB人流50%

5) 人流150%, 3回目全年代, CB人流50%, VP80%



感染者数22/1/1-4/30

2022/4/13

3,349

感染者数22/1/1-4/30

2022/2/22

1,283

# 3回目接種 全年代180日

	1	2	3
夜間滞留人口*1	100%	100%	125%
3回目接種*2	医療,高齡	医療,高齡	医療,高齡
接種証明制限*3	0%	0%	0%
人流制限*4	0%	50%	50%

\*1 繁華街21時滞留人口の増加率 = (10/8以降)/(6/25-8/8期間平均)

\*2 ワクチン3回目接種 180日経過者に対して12/1から開始

\*3 ワクチン接種証明 or PCR/抗原検査陰性証明がない人の利用制限率

\*4 陽性者1000人で夜間滞留人口制限 (遅れ時間14日)

1回目効果,2回目効果 : 33%. 88%

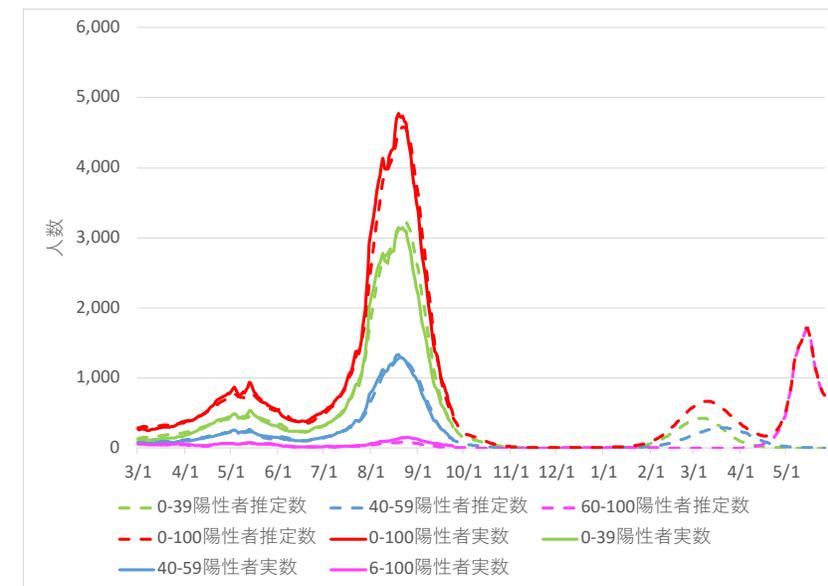
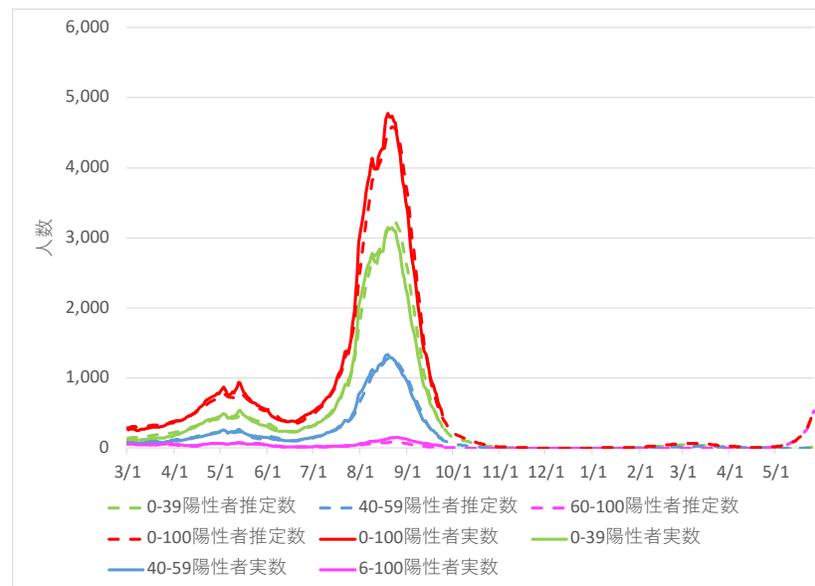
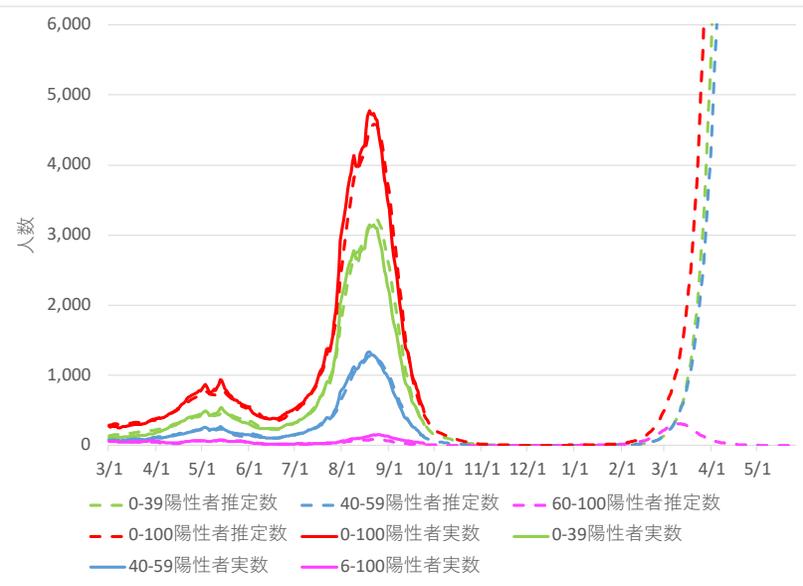
ワクチン2回目接種180日後発症予防効果 : 66%

ワクチン接種率 全人口(39歳以下,40-59歳,60歳以上) : 55%, 80%, 90%

1) 人流100%, 3回目医療高齡

2) 人流100%, 3回目医療高齡, CB人流50%

3) 人流125%, 3回目医療高齡, CB人流50%



感染者数22/1/1-4/30

2022/4/30

79,460

感染者数22/1/1-4/30

2022/3/6

65

感染者数22/1/1-4/30

2022/3/10

671

# 3回目接種 全年代180日

	4	5
夜間滞留人口*1	150%	150%
3回目接種*2	医療,高齡	医療,高齡
接種証明制限*3	0%	80%
人流制限*4	0%	50%

\*1 繁華街21時滞留人口の増加率 = (10/8以降)/(6/25-8/8期間平均)

\*2 ワクチン3回目接種 180日経過者に対して12/1から開始

\*3 ワクチン接種証明 or PCR/抗原検査陰性証明がない人の利用制限率

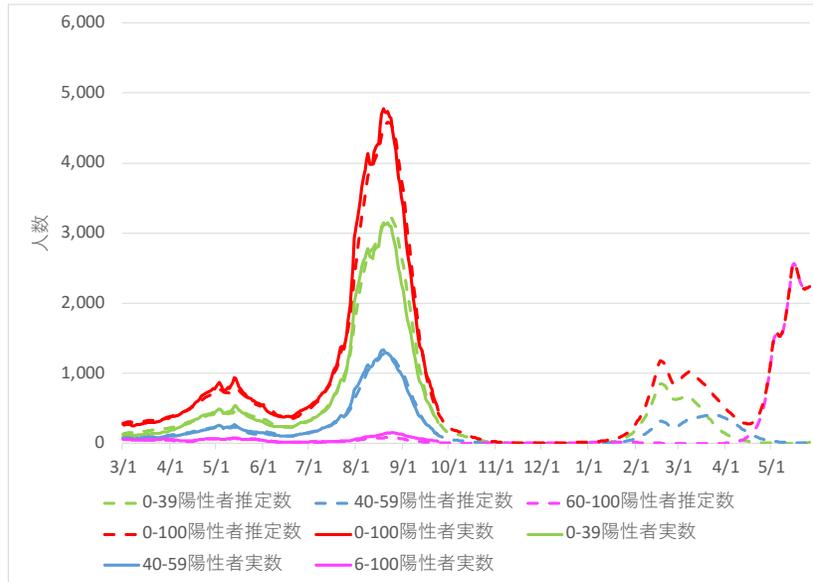
\*4 陽性者1000人で夜間滞留人口制限 (遅れ時間14日)

1回目効果,2回目効果 : 33%. 88%

ワクチン2回目接種180日後発症予防効果 : 66%

ワクチン接種率 全人口(39歳以下,40-59歳,60歳以上) : 55%, 80%, 90%

4) 人流150%, 3回目医療高齡, CB人流50%

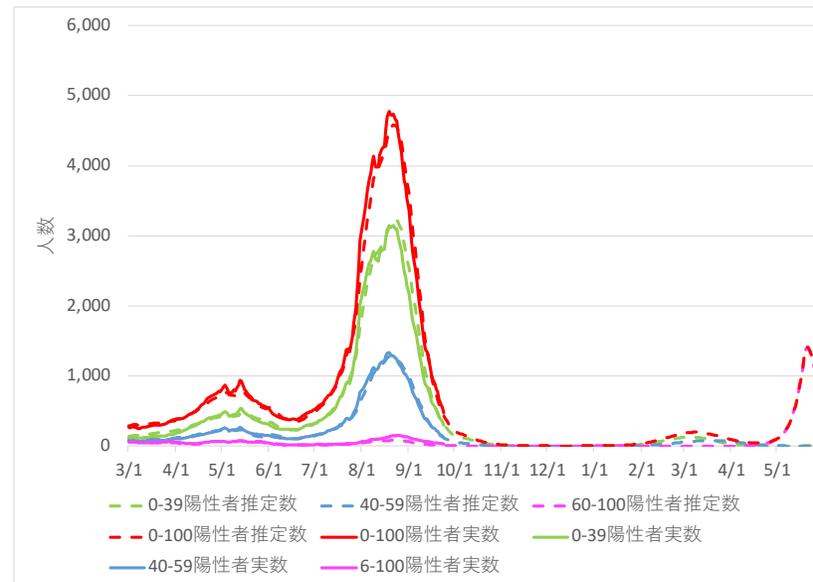


感染者数22/1/1-4/30

2022/2/17

1,177

5) 人流150%, 3回目医療高齡, CB人流50%, VP80%



感染者数22/1/1-4/30

2022/3/8

198

# モデル設定

## 1. SEIR数理モデルとAI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歳～39歳、40歳～59歳、60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。県外からの陽性患者流入者数をモバイル空間統計データ(NTTドコモ)およびLocationMind xPop\*1から推定してモデルに組み込み、2021年3月1日～9月30日のデータからモデルを学習させた。

## 2. ワクチン効果と行動変容効果

- ワクチン効果は、アルファ株に対して、第1回で57%、第2回で94%の発症予防効果があったとした（デルタ株に対しては実験で設定）3/1-9/30の実効再生産数・人口流動数の推移は実測値を使用。10/1以降は、直近の7日間移動平均、10/8以降は6/25～8/8の期間平均を使用した。
- 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） 0.08%, 0.065%（高齢者1回目, 2回目見込み）  
6/21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） k=0.9%  
8/15以降1.3%
- ワクチン減衰効果  
デルタ株が発生した2021年6月では感染抑制効果が64%(イスラエル保健省), アルファ株において90日で78%(Oxford, Nature), デルタ株において90日で65.5%(NEJM), 143日中央値で82%(米国CDC)まで減衰するとした報告を参照に, これらの単純平均を取り, 180日で66%まで減衰するとした。ブースター接種は, 12/1より2回目接種から180日および240日経過した人から接種を開始し, 2回目接種直後の効果に戻るとした。
  - <https://www.gov.il/en/departments/news/05072021-03>, <https://www.gov.il/en/departments/news/06072021-04>
  - Resurgence of SARS-CoV-2 Infection in a Highly Vaccinated Health System Workforce, DOI: 10.1056/NEJMc2112981, The new England journal of medicine
  - COVID vaccines protect against Delta, but their effectiveness wanes, doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02261-8>, Nature
  - Comparative Effectiveness of Moderna, Pfizer-BioNTech, and Janssen (Johnson & Johnson) Vaccines in Preventing COVID-19 Hospitalizations Among Adults Without Immunocompromising Conditions — United States, March–August 2021, CDC vol.70, 17, Sep. 2021

\*1 「LocationMind xPop」データは、NTTドコモが提供するアプリケーション(※)の利用者より、許諾を得た上で送信される携帯電話の位置情報を、NTTドコモが総体的かつ統計的に加工を行ったデータ。位置情報は最短5分毎に測位されるGPSデータ（緯度経度情報）であり、個人を特定する情報は含まれない。※ドコモ地図ナビサービス(地図アプリ・ご当地ガイド)等の一部のアプリ

# モデル詳細

## 年代別ワクチン効果SEIRモデル

$$\frac{dS_i}{dt} = mN_i - mS_i - \sum_{i'} \frac{\alpha_{i,i'} b_{i,i',t} S_i (I_{i'} + in\_risk_{i',t})}{N_i} - \sum_k \sigma_{i,k} \lambda_{i,k} N_i$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \sum_{i'} \frac{\alpha_{i,i'} b_{i,i',t} S_i (I_{i'} + in\_risk_{i',t})}{N_i} - (m + a) E_i$$

$$\frac{dI_i}{dt} = a E_i - (m + g) I_i$$

$$\frac{dR_i}{dt} = g I_i - m R_i + \sum_k \sigma_{i,k} \lambda_{i,k} N_i$$

$$S_i \leftarrow S_i + \sum_j S\_leave_{i,j,t} - \sum_j S\_leave_{j,i,t}$$

$$E_i \leftarrow E_i + \sum_j E\_leave_{i,j,t} - \sum_j E\_leave_{j,i,t}$$

$$I_i \leftarrow I_i + \sum_j I\_leave_{i,j,t} - \sum_j I\_leave_{j,i,t}$$

$$R_i \leftarrow R_i + \sum_j R\_leave_{i,j,t} - \sum_j R\_leave_{j,i,t}$$

$$N_i \leftarrow S_i + E_i + I_i + R_i$$

$N_i$  = 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

$\alpha_{i,i'}$  = 年代間感染率

$b_{i,i',t}$  = 時刻  $t$  における感染率

$a$  = 感染症の発症率

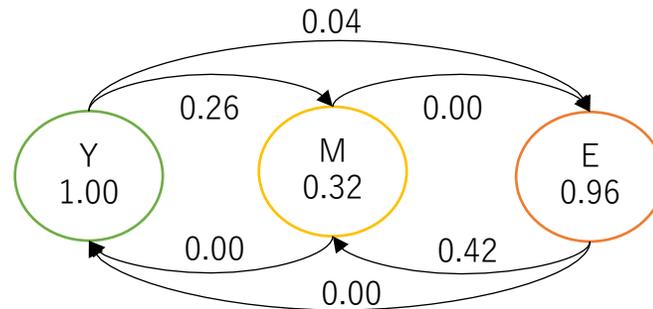
$g$  = 感染症からの回復率

$\sigma_k$  =  $k$  回目の単位時間当たりのワクチン接種割合パラメータ

$\lambda_k$  =  $k$  回目のワクチンによる免疫獲得確率パラメータ

## 年代別感染推移確率 (右から左へ伝播)

		Age_Y	Age_M	Age_E
Age_Y	←	1.00	0.00	0.00
Age_M	←	0.26	0.32	0.42
Age_E	←	0.04	0.00	0.96



Yは0歳以上39歳以下、Mは40歳以上59歳以下、Eは60歳以上を表す。

## 逆シミュレーションモデル

$$flow\_risk_t = \frac{\sum_{i=1}^j flow_{i,t} * c_{pt} * ur}{pop}$$

$$b_{i,j} = a_{i,j} (R_0 d_t^i c_1^i - c_2^i)$$

$$\min \sum_{t=1}^{now} (pred_t(b_{i,j}, S_0, E_0, I_0, R_0) - observ_t)^2$$

subject to.

$$x_1^i > 0$$

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

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

$R_0$  : 基本再生産数

$$d_t^i : \text{感染増加率} = \frac{ma_t^w ip}{ma_{t-1}^w ip}$$

$ma_t^w$  : 7日間移動平均

$ip$  : 感染者数

$c_k^i$  : 増加率補正係数

$a_{i,j}$  : 年代間感染係数

# 東京近郊市街地個体ベースモデル

- 東京郊外の世帯構成に基づいて2つの街で構成された1348人のエージェントで表現したモデルを構築
- ワクチン接種証明による職場、飲食店、イベント会場への入場制限を20%~100%各500回試行からRt変化率を測定（飲食は友達ネットワークを制限）
- 感染者数20人/10万人(≒3000人/東京)

各街の世帯構成	世帯数
高齢单身	18
高齢夫婦	30
3世代同居	6
成年单身	40
成年夫婦	35
親1人子供1人	4
親2人子供1人	21
親2人子供2人	12

