

# 今後の水際対策緩和の感染への影響

2022年7月14日

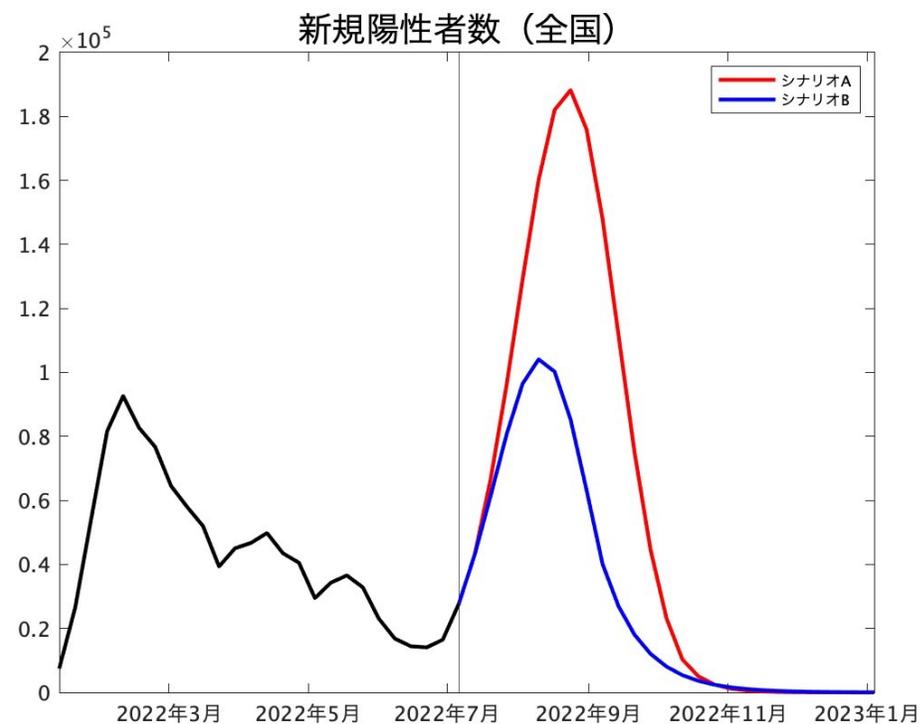
千葉安佐子（東京財団）・ALEX MAGRO・仲田泰祐・  
岡本亘・佐々木大・畝矢寛之（東京大学）

# 分析

- 日本全国で7月以降に訪日外国人が2019年の $X$ 倍に回復したら感染状況はどう変化するかを分析
  - $X = 0.25, 0.5, 1$  の3ケース（一日あたり入国者数：約2万人, 4万人, 8万人に対応）
  - 2022年5月末における訪日外国人数の水準が継続する場合をベースケースとして設定し、訪日外国人数を $X$ 倍に回復させた場合のベースケースからの差分を記録
- 2つのモデルを用いて検証（モデルの詳細は Appendices）
  - 日本人と訪日外国人の2つのグループを対象とした Multi-SIRモデル
    - Fujii & Nakata (2021) のモデルに、訪日外国人のパスを追加してモデルを拡張
  - 分枝過程モデル
    - Linton et al. (2021) のモデルを参考に分析

# シナリオ

- 新規陽性者数については、2つのシナリオを提示（新規陽性者数の「予測」ではない点に注意）
  - シナリオA：ピーク時の新規陽性者数が第6波の約2倍
  - シナリオB：ピーク時の新規陽性者数が第6波と同程度



# 重要な仮定①

- 訪日外国人は日本全国をランダムに動き回り、全ての日本人と均一に接触する
  - この仮定が現実よりも悲観的かもしれない理由：
    - 訪日外国人が行く場所・接触する人間は限られると考えられるため、「日本人全員と接触」の仮定は現実よりも悲観的
  - この仮定が現実よりも楽観的かもしれない理由：
    - 短期間での集団内における濃厚接触（例：宿泊施設内でのクラスターの発生など）は考慮できていないため、「均一な接触」の仮定は現実よりも楽観的
- 訪日外国人のワクチン接種率について、7月1日時点での出身国別のワクチン接種率を加重平均して使用

## 重要な仮定②

- 訪日外国人が単位時間あたりに接触する人数は日本人の2倍（「相対接触率」と定義）と設定
  - 分岐過程モデルでは1倍, 1.5倍, 2倍の3ケースを計算
- 新型コロナウイルス感染症に感染している訪日外国人が空港検疫で偽陰性となり、感染性を有したまま入国してしまう割合を  $f\_rate$ （「感染者入国割合」と定義）と設定
  - $f\_rate = 0.014\%, 0.16\%, 0.23\%$  の3ケースを計算
    1. 今後の世界全体の新規感染者数が 2021年の平均程度であるという仮定
    2. 今後の世界全体の新規感染者数が第6波（2021年12月～2022年3月）の平均程度であるという仮定
    3. 今後の世界全体の新規感染者数が第6波（2021年12月～2022年3月）の1.5倍程度であるという仮定
  - 空港検疫の検査における感度は 0.6 と仮定
    - 厚生労働省「COVID-19抗原定性検査の活用に関する考察（暫定）」（中島、小坂、和田、脇田）  
<https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000777215.pdf>
  - 計算方法は Linton et al. (2021) に準拠（詳細は Appendices）

# 結果 (Two-Group SIR モデル)

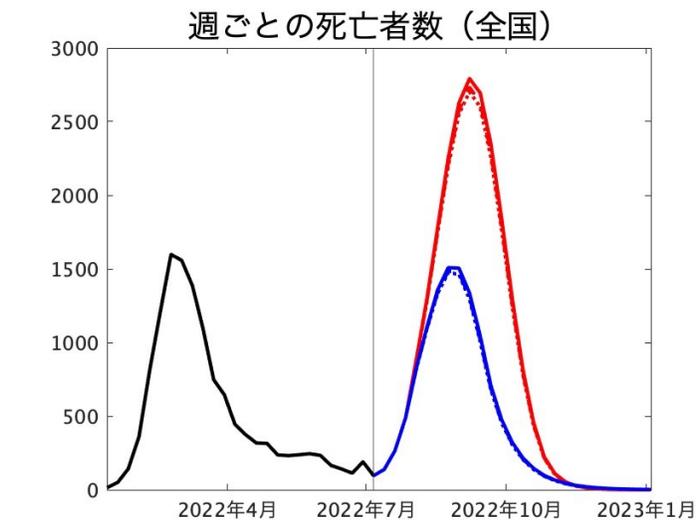
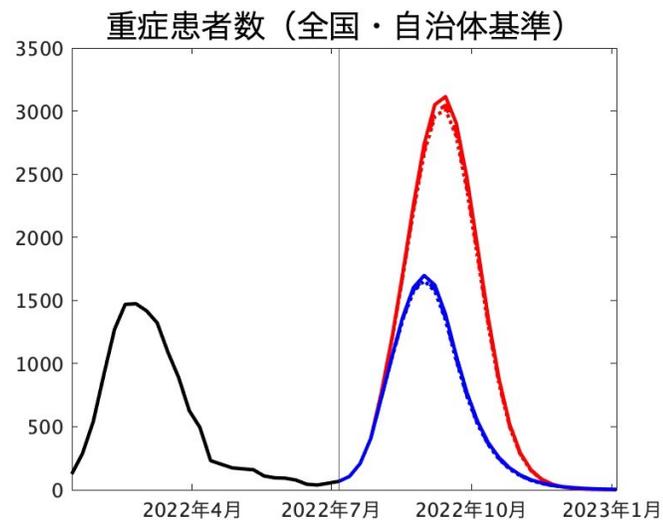
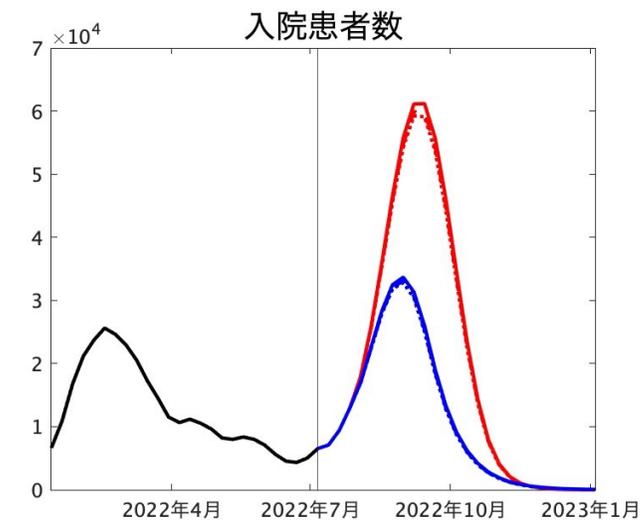
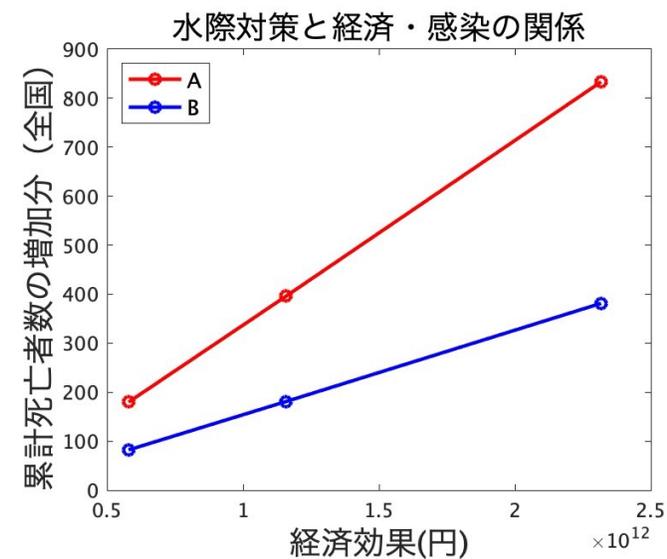
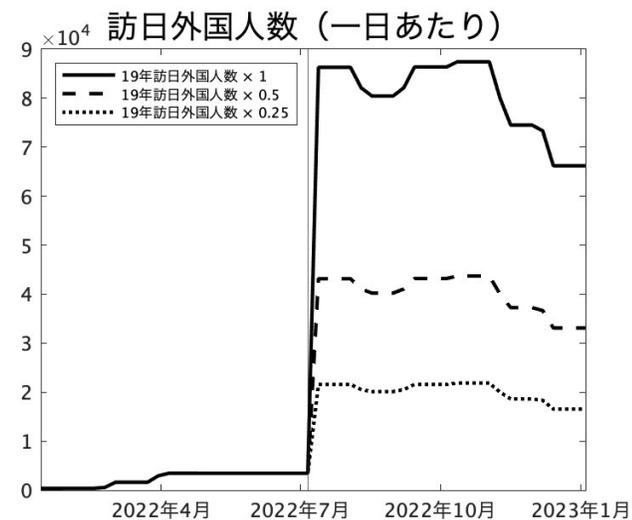
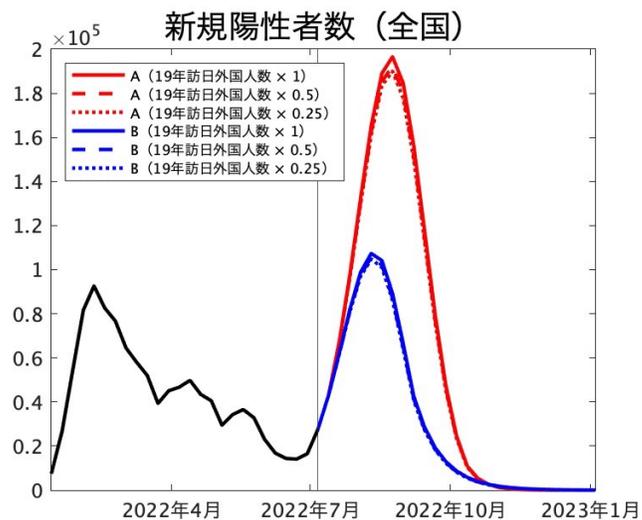
## 結果の要約（相対接触率 = 2倍, 感染者入国割合 = 0.014%）

シナリオ	A			B		
2019年のX倍	0.25	0.5	1	0.25	0.5	1
一日あたり入国者数	約2万人	約4万人	約8万人	約2万人	約4万人	約8万人
新規陽性者数（一日あたり平均）	+479	+1054	+2219	+219	+483	+1017
新規陽性者数（一日あたりピーク時）	+1797	+3958	+8336	+713	+1566	+3287
重症患者数（一日あたり平均）	+1	+3	+5	+1	+1	+2
重症患者数（一日あたりピーク時）	+4	+9	+19	+2	+4	+8
半年間の累計死亡者数	+180	+396	+833	+82	+181	+381
経済効果（兆円）	+0.58	+1.16	+2.32	+0.58	+1.16	+2.32

### <経済効果と死亡者数の弾力性>

シナリオA : 27（億円／人）, シナリオB : 58（億円／人）

# 陽性者数の推移（相対接触率 = 2倍, 感染者入国割合 = 0.014%）



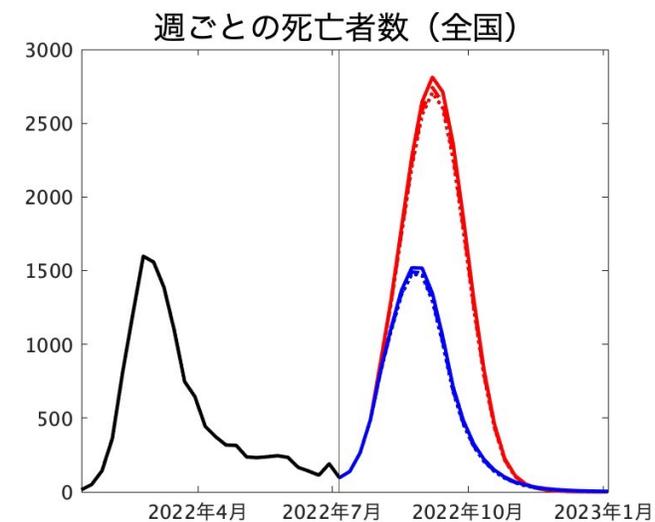
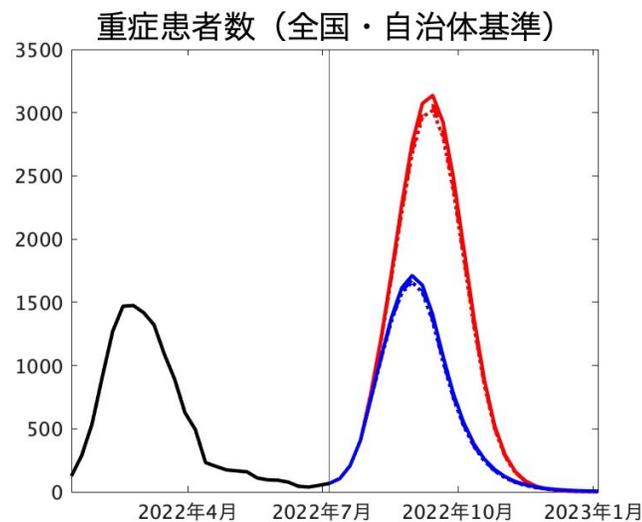
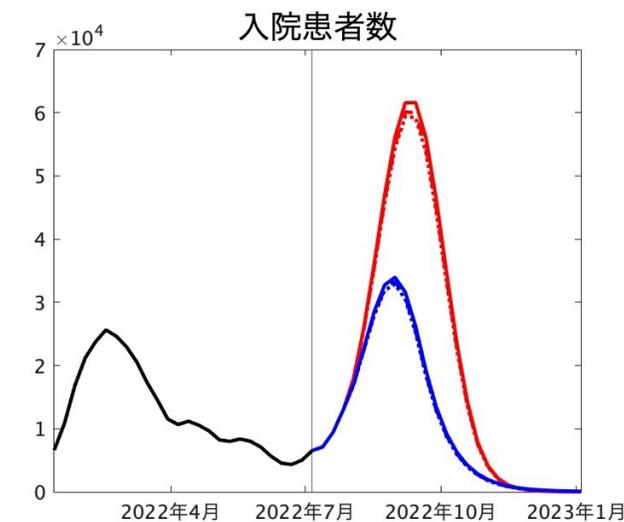
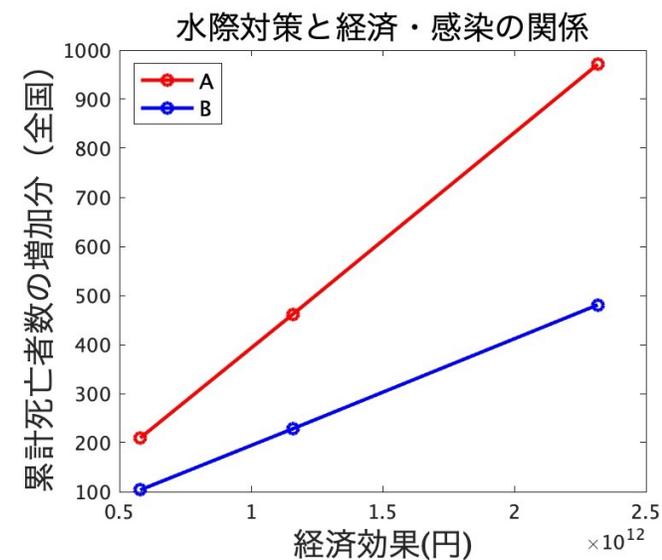
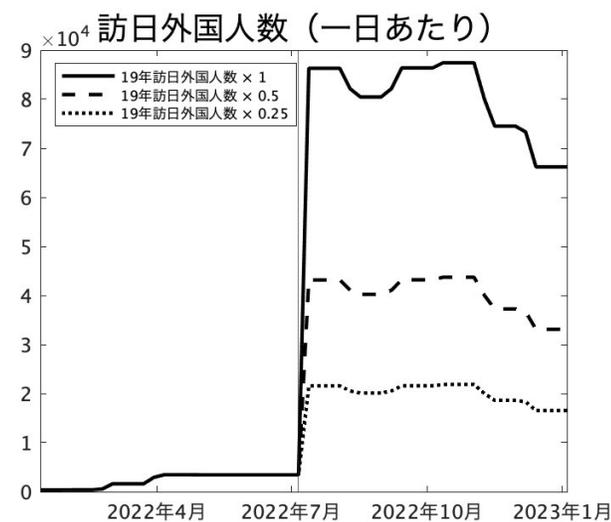
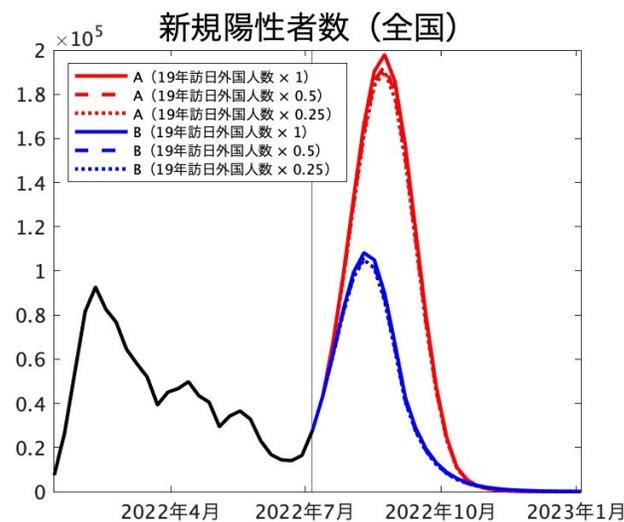
## 結果の要約（相対接触率 = 2倍, 感染者入国割合 = 0.16%）

シナリオ	A			B		
2019年のX倍	0.25	0.5	1	0.25	0.5	1
一日あたり入国者数	約2万人	約4万人	約8万人	約2万人	約4万人	約8万人
新規陽性者数（一日あたり平均）	+559	+1231	+2589	+278	+613	+1291
新規陽性者数（一日あたりピーク時）	+2079	+4580	+9649	+882	+1937	+4069
重症患者数（一日あたり平均）	+1	+3	+6	+1	+1	+3
重症患者数（一日あたりピーク時）	+5	+10	+22	+2	+4	+9
半年間の累計死亡者数	+210	+462	+971	+104	+228	+481
経済効果（兆円）	+0.58	+1.16	+2.32	+0.58	+1.16	+2.32

### ＜経済効果と死亡者数の弾力性＞

シナリオA : 23（億円／人）, シナリオB : 46（億円／人）

# 陽性者数の推移（相対接触率 = 2倍, 感染者入国割合 = 0.16%）



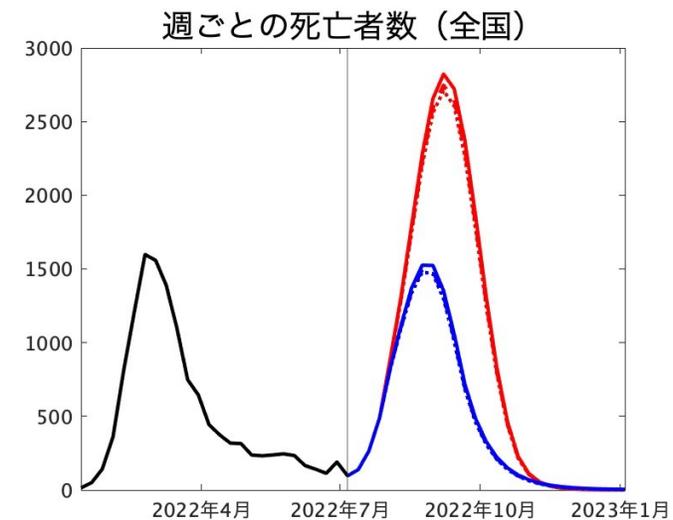
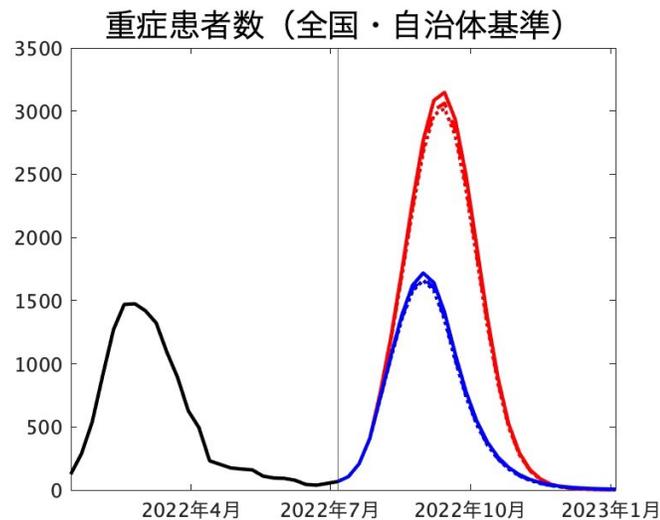
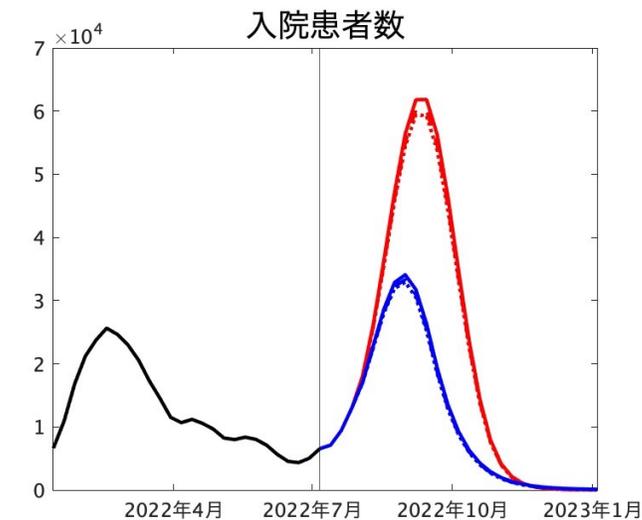
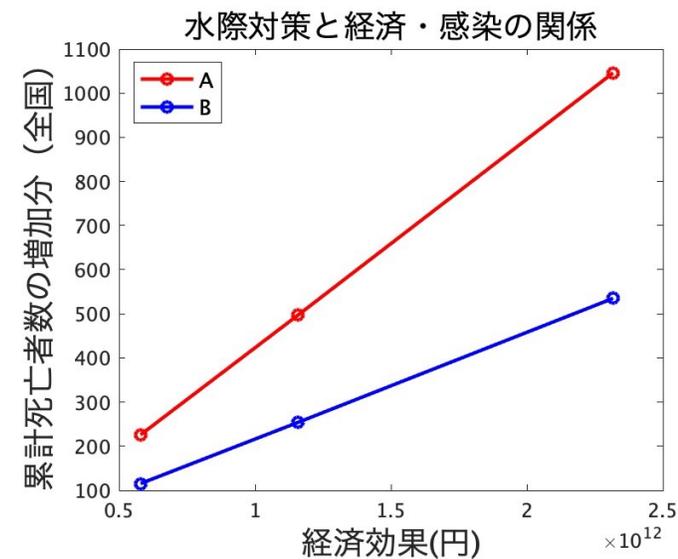
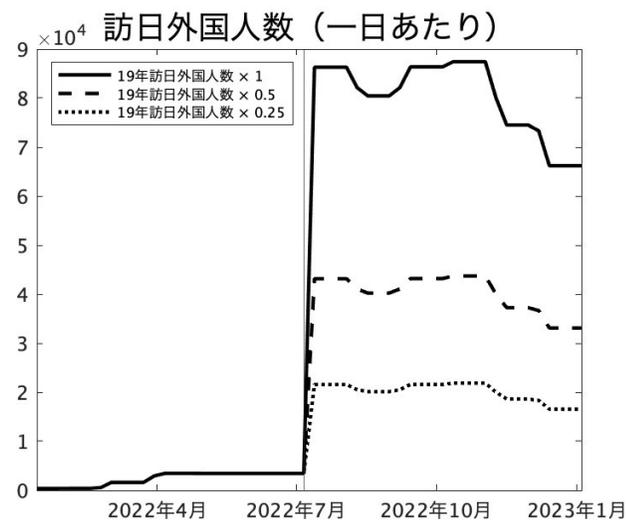
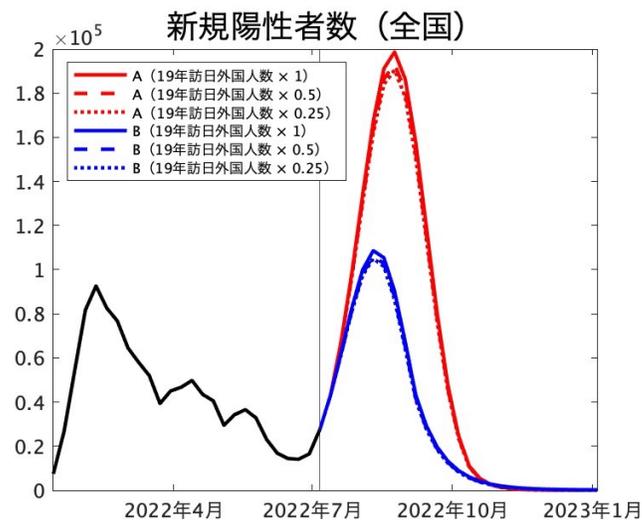
## 結果の要約（相対接触率 = 2倍, 感染者入国割合 = 0.23%）

シナリオ	A			B		
2019年のX倍	0.25	0.5	1	0.25	0.5	1
一日あたり入国者数	約2万人	約4万人	約8万人	約2万人	約4万人	約8万人
新規陽性者数（一日あたり平均）	+602	+1327	+2791	+310	+684	+1441
新規陽性者数（一日あたりピーク時）	+2232	+4919	+10365	+974	+2140	+4496
重症患者数（一日あたり平均）	+1	+3	+7	+1	+2	+3
重症患者数（一日あたりピーク時）	+5	+11	+23	+2	+5	+10
半年間の累計死亡者数	+226	+497	+1046	+115	+254	+535
経済効果（兆円）	+0.58	+1.16	+2.32	+0.58	+1.16	+2.32

### ＜経済効果と死亡者数の弾力性＞

シナリオA : 2I（億円／人）, シナリオB : 4I（億円／人）

# 陽性者数の推移（相対接触率 = 2倍, 感染者入国割合 = 0.23%）



# 結果（分枝過程モデル）

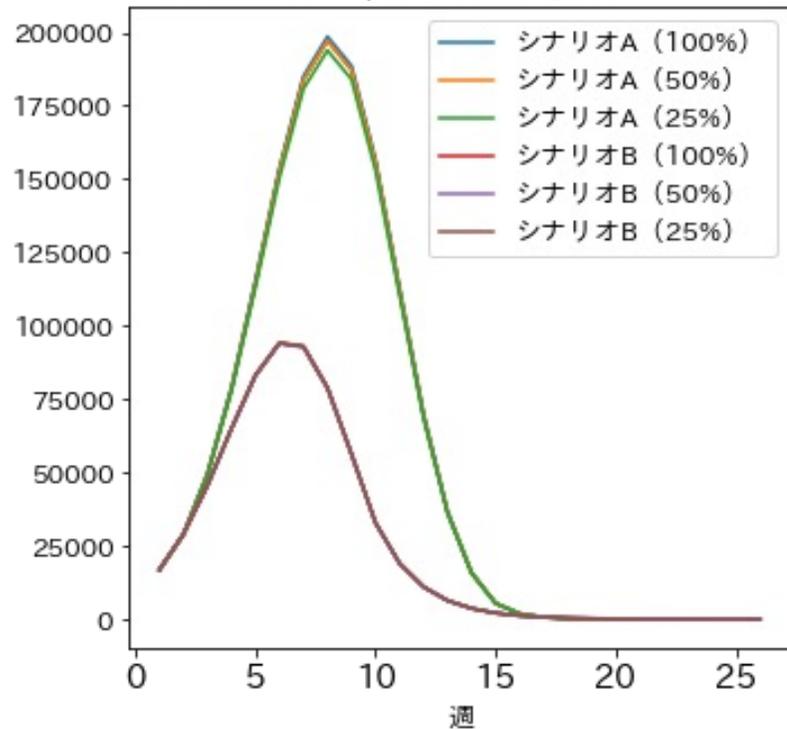
# 結果の要約

シナリオ		A			B			
2019年の×倍 一日あたり入国者数		0.25 約2万人	0.5 約4万人	I 約8万人	0.25 約2万人	0.5 約4万人	I 約8万人	
新規陽性者数 (ピーク時)	相対接触率 1倍	感染者入国割合 0.014%	-3453 [-12647~7124]	-123 [-9357~9314]	1245 [-9980~9905]	103 [-5063~5052]	-55 [-5041~5433]	192 [-4803~4821]
		0.16%	1817 [-7895~18909]	3819 [-6321~18901]	8369 [-1294~20064]	1921 [-2839~7279]	2323 [-4197~6940]	5176 [-424~9876]
		0.23%	1149 [-10846~17270]	5237 [-5558~16855]	13100 [2369~25185]	1961 [-4782~6137]	2776 [-2163~8207]	6916 [3031~11930]
	相対接触率 1.5倍	感染者入国割合 0.014%	918 [-7550~12877]	2058 [-8058~14819]	2272 [-7622~12760]	160 [-4270~4402]	388 [-4308~6524]	335 [-4282~5565]
		0.16%	2772 [-7843~12927]	7756 [-2515~18687]	17226 [4860~24934]	1762 [-3750~7255]	2898 [-3213~7861]	7177 [2267~11218]
			0.23%	4205 [-9870~14484]	13070 [-583~24005]	22031 [10977~35372]	2176 [-4087~8525]	5577 [-654~9193]
相対接触率 2倍		感染者入国割合 0.014%	1537 [-7577~12880]	3754 [-8371~15787]	4002 [-4547~16056]	-40 [-5499~5194]	110 [-5227~4871]	422 [-4766~5479]
	0.16%	4893 [-5111~16813]	9793 [1608~20989]	20542 [10408~31207]	1995 [-4569~8591]	4739 [355~10765]	9137 [3005~13096]	
	0.23%	5402 [-5941~16060]	12853 [-1898~23714]	29000 [18648~42300]	2493 [-1510~6920]	7236 [2174~12136]	13961 [6411~21313]	

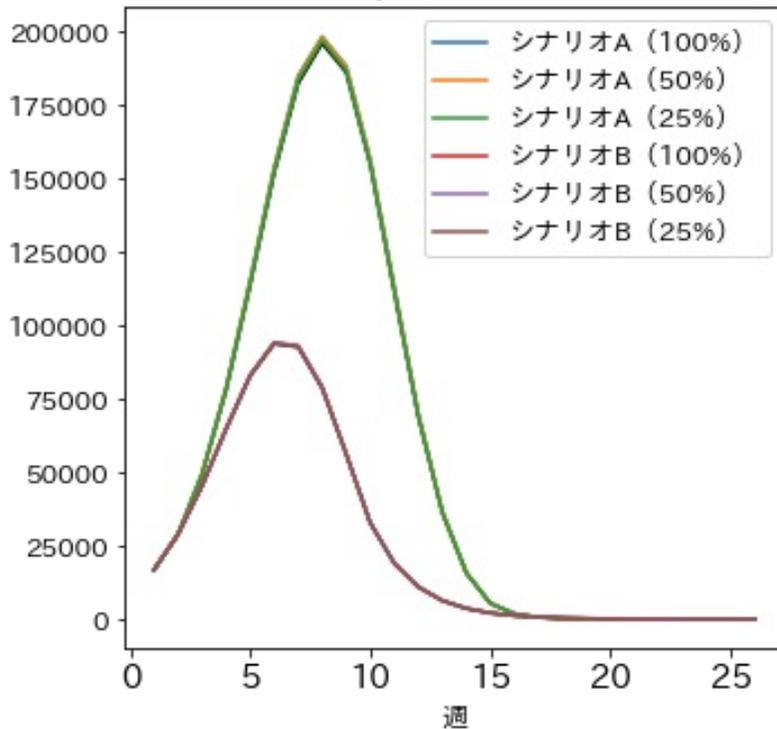
※ [ ] 内は 90%CI

# 新規陽性者数の推移（感染者入国割合: 0.014%）

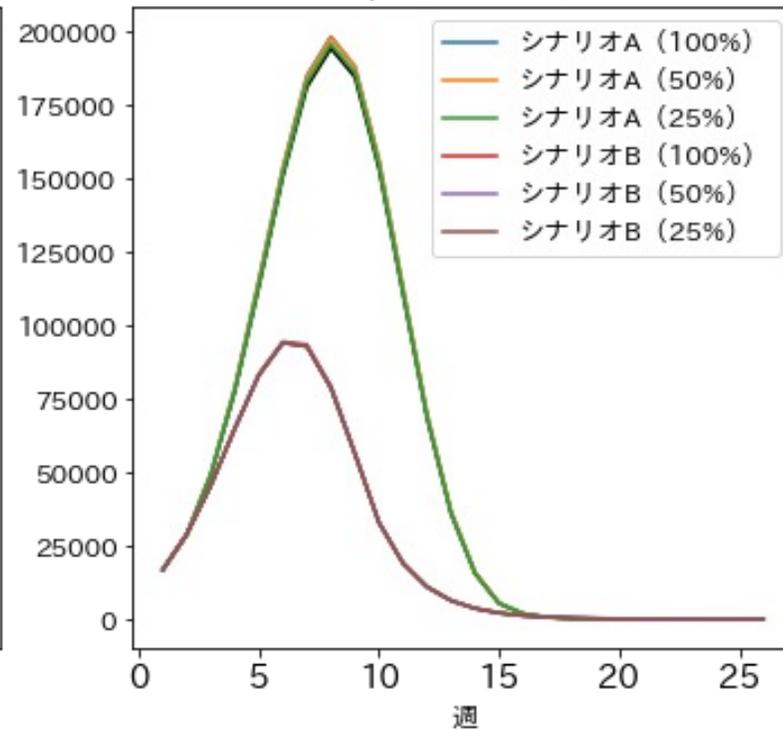
相対接触率: 1, 感染者入国割合: 0.014%



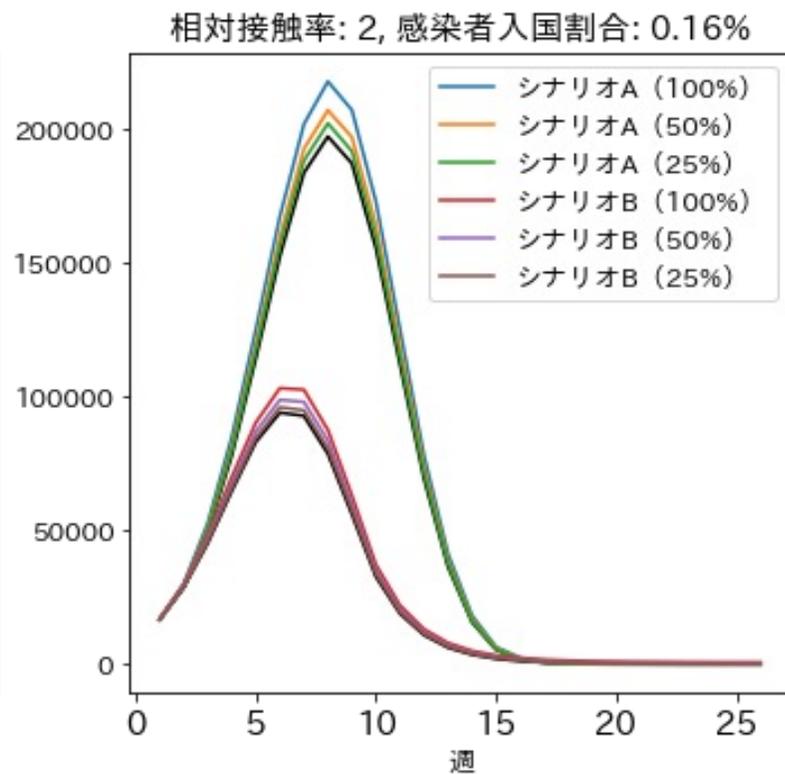
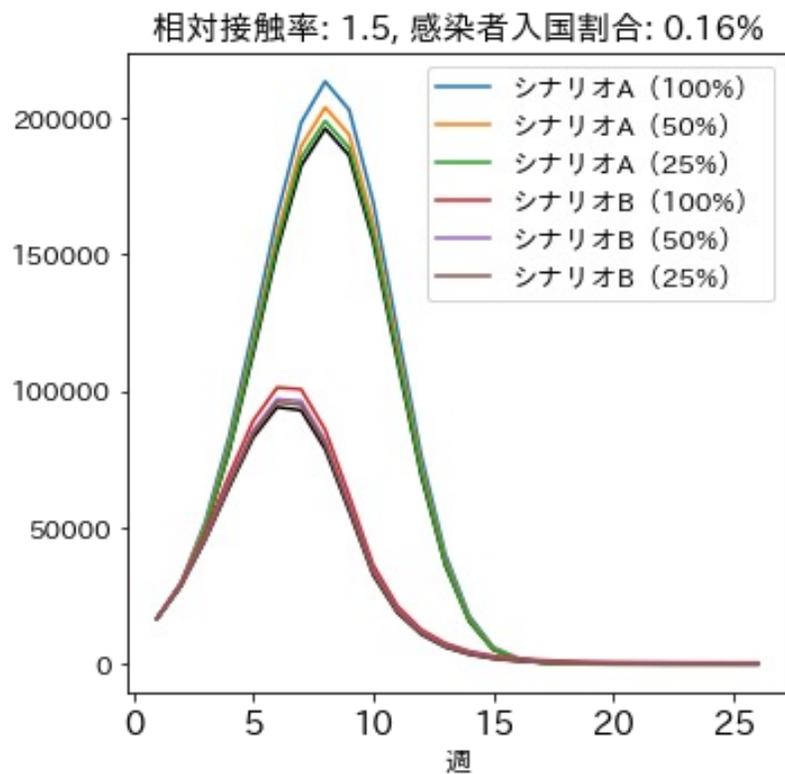
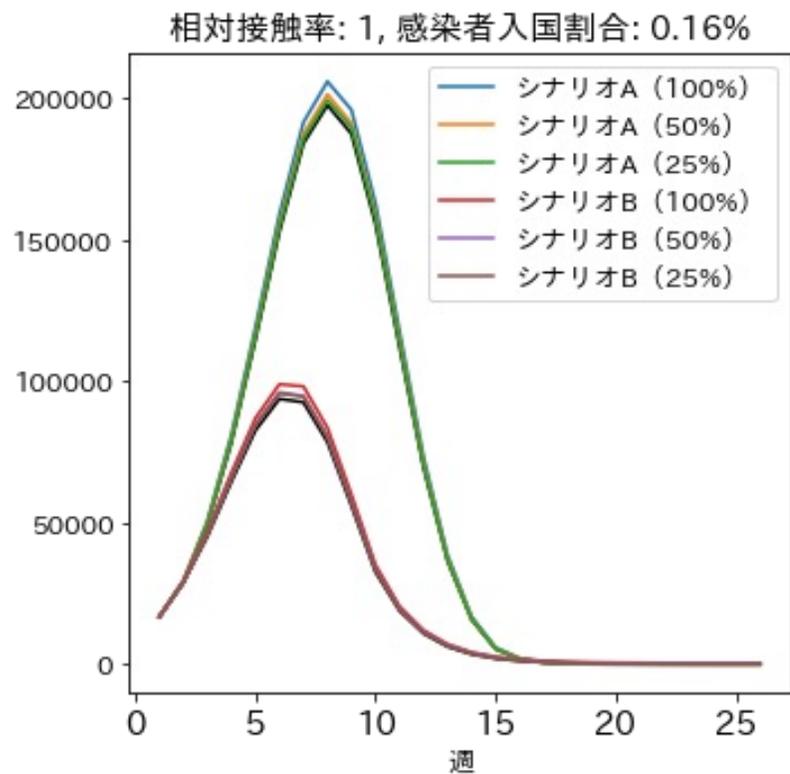
相対接触率: 1.5, 感染者入国割合: 0.014%



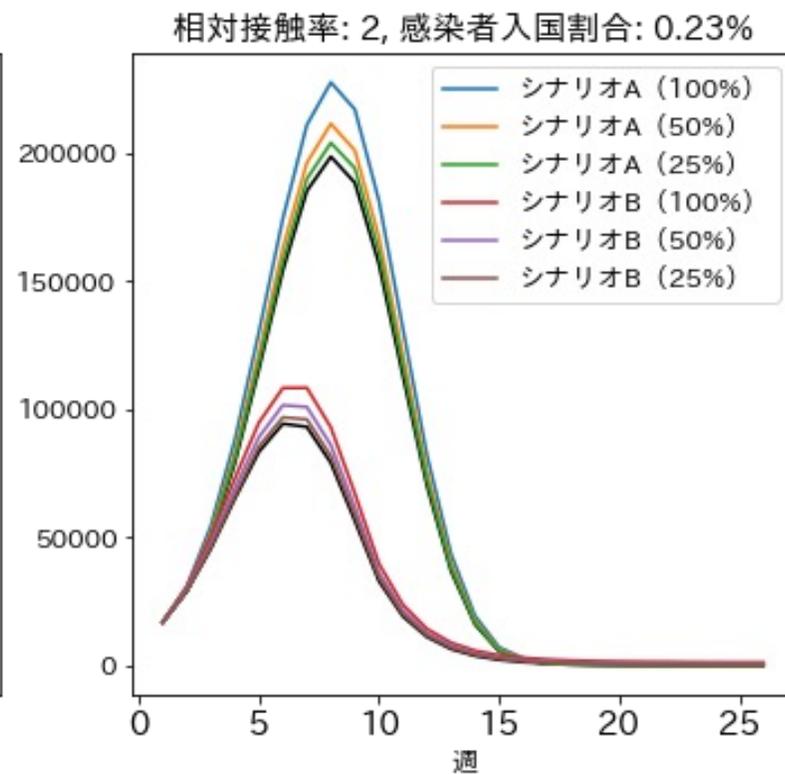
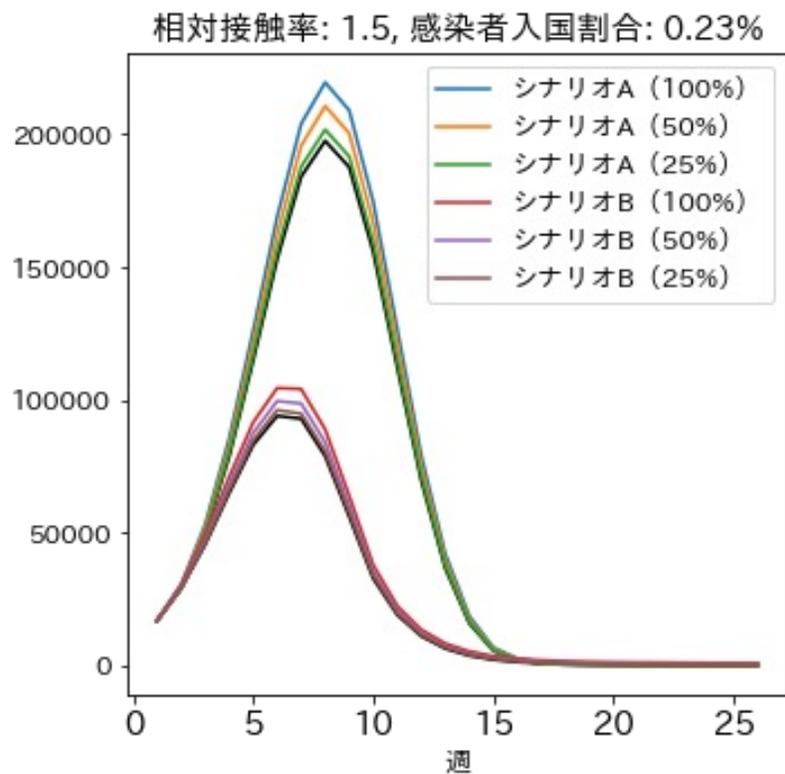
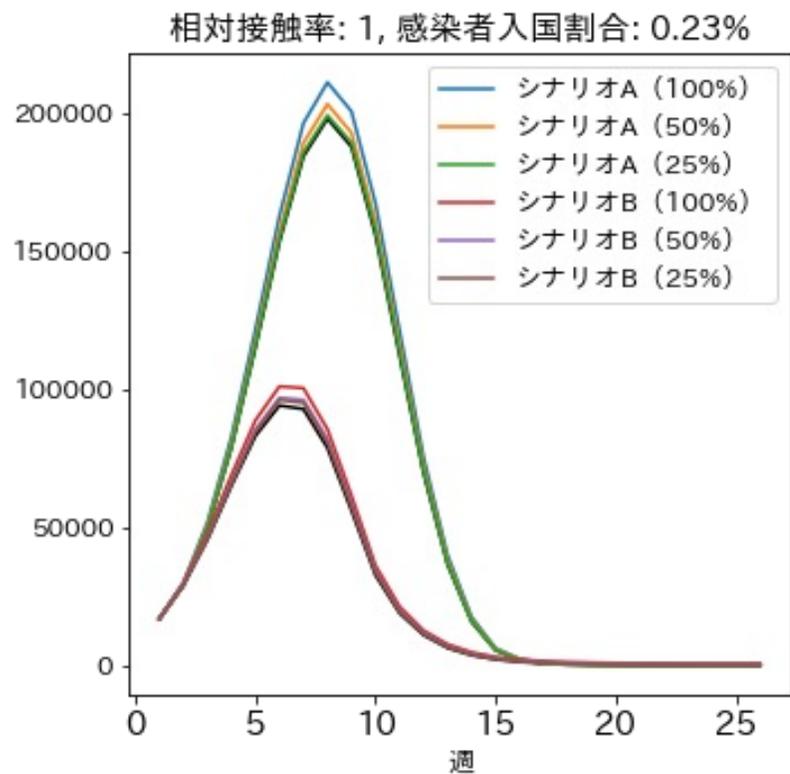
相対接触率: 2, 感染者入国割合: 0.014%



# 新規陽性者数の推移（感染者入国割合:0.16%）



# 新規陽性者数の推移（感染者入国割合: 0.23%）



- Taisuke Nakata is supported by JSPS Grant-in-Aid for Scientific Research (KAKENHI), Project Number 22H04927, the Research Institute of Science and Technology for Society at the Japan Science and Technology Agency, COVID-19 AI and Simulation Project (Cabinet Secretariat), the Center for Advanced Research in Finance at the University of Tokyo, and the Tokyo Center for Economic Research.
- Research papers and policy reports
  - <https://www.bicea.e.u-tokyo.ac.jp/>
  - <https://covid19-icu-tool.herokuapp.com/>
  - <https://covid19outputjapan.github.io/JP/resources.html>

# Appendices

# Two-Group SIR モデル

# モデル（日本人）

- Fujii & Nakata (2021) のモデルをそのまま利用

$$S_J(t+1) = S_J(t) - N_J(t) - \{E_{J1}(V_{J1}(t) - V_{J2}(t)) + E_{J2}(V_{J2}(t) - V_{J3}(t)) + E_{J3}V_{J3}(t)\}$$

$$I_J(t+1) = I_J(t) + N_J(t) - \gamma_J I_J(t) - \delta_J I_J(t)$$

$$H_J(t+1) = H_J(t) + r_{hospital,J} I_J(t) - \gamma_{hospital,J} H_J(t)$$

$$ICU_J(t+1) = ICU_J(t) + r_{ICU,J} I_J(t) - \gamma_{ICU,J} ICU_J(t) - \delta_J I_J(t)$$

$$D_J(t+1) = D_J(t) + \delta_J I_J(t)$$

- $H_J(t), ICU_J(t)$  : t期の入院患者数、および重症患者数
- $E_{Ji}$  : 日本人のi回目のワクチン接種による感染予防効果
- $V_{Ji}$  : 日本人のi回目ワクチン接種者数
- $\gamma_J, \delta_J$  : 日本人感染者の回復率、および死亡率
- $r_{hospital,J}, \gamma_{hospital,J}$  : 日本人感染者の入院率、および入院患者の回復率
- $r_{ICU,J}, \gamma_{ICU,J}$  : 日本人感染者の重症化率、および重症患者の回復率
- 本分析においては2022年6月以降の追加的なワクチン接種を考慮していないため、 $t > 0$ においては常に  $V_{Ji} = 0$  であることに留意

# モデル（訪日外国人）

$$v_F = E_{F1}(v_{F1} - v_{F2}) + E_{F2}(v_{F2} - v_{F3}) + E_{F3}v_{F3}$$

$$S_F(t+1) = S_F(t) - N_F(t) + (1 - f_{rate})\{1 - v_F - r_{imm}\} \left( \frac{IN(t)}{g} \right) - \frac{7}{l_{stay}} S_F(t)$$

$$I_F(t+1) = I_F(t) + N_F(t) + f_{rate} \left( \frac{IN(t)}{g} \right) - \gamma_F I_F(t)$$

- $f_{rate}$  : 入国した人のうち空港検疫で誤って陰性と判定されたが、陽性の人の割合
- $E_{Fi}$  : 訪日外国人の*i*回目ワクチン接種による感染予防効果
- $v_{Fi}$  : 訪日外国人の*i*回目ワクチン接種率
- $r_{imm}$  : 訪日外国人の自然免疫獲得割合
- $IN(t)$  :  $t$ 期の訪日外国人の数
- $g$  : 訪日外国人1グループの平均人数
- $l_{stay}$  : 平均滞在日数
- $\gamma_F$  : 訪日外国人感染者の回復率
- 訪日外国人はグループで行動する機会が多いと想定されることから、グループを単位として数える。
- 感染が拡大してきた国においては自然免疫の獲得者が多くいることが想定されるので、考慮に入れる。

# モデル（日本人と訪日外国人の接触）

$$N_J(t) = \frac{\beta(t)}{POP} S_J(t) \{I_J(t) + \epsilon_F I_F(t)\}$$
$$N_F(t) = \frac{\beta(t)}{POP} \mu_F \epsilon_F S_F(t) \{I_J(t) + \epsilon_F I_F(t)\}$$

- $\epsilon_F$  : 訪日外国人は、日本人に比べて  $\epsilon_F$  倍人と接触する。
- $\mu_F$  : 訪日外国人の接触ごとの感染確率は、日本人に比べて  $\mu_F$  倍である。
- SIRモデルの考え方に則り、新規陽性者数 = (定数項) × (受容者の数) × (受容者と感染者の接触回数) × (接触ごとの感染確率) で計算される。

# パラメター設定

パラメター	説明	値
$E_J$	ワクチン接種による感染予防効果 (日本人)	[1回目, 2回目, 3回目] = [0.16, 0.47, 0.66]
$V_J$	ワクチン接種者数 (日本人)	[1回目, 2回目, 3回目] = [103343299, 101697857, 70559800]
$\gamma_J$	日本人感染者の回復率	$\frac{7}{9}$
$\delta_J$	日本人感染者の死亡率	直近の水準から4週間かけて「第六波の平均」へと線形に増加するように調整
$r_{hospital,J}$	日本人感染者の入院率	直近の水準から4週間かけて「第六波の平均」へと線形に増加するように調整
$\gamma_{hospital,J}$	日本人入院患者の回復率	$\frac{7}{10}$
$r_{ICU,J}$	日本人感染者の重症化率	直近の水準から4週間かけて「第六波の平均」へと線形に増加するように調整
$\gamma_{ICU,J}$	日本人重症患者の回復率	$\frac{7}{12}$

# パラメータ設定

パラメータ	説明	値
$f_{rate}$	入国した人のうち空港検疫で誤って陰性と判定されたが、陽性の人の割合	0.014%, 0.16%, 0.23%
$E_F$	ワクチン接種による感染予防効果（訪日外国人）	日本人と同じ
$v_F$	ワクチン接種率（訪日外国人）	7/1時点の各国のワクチン接種率を加重平均
$r_{imm}$	訪日外国人の自然免疫獲得割合	0.1038
$g$	訪日外国人1グループの平均人数	2.5
$l_{stay}$	訪日外国人の平均滞在日数	8.8
$\gamma_F$	訪日外国人感染者の回復率	$\frac{7}{9}$
$\epsilon_F$	訪日外国人は、日本人に比べて $\epsilon_F$ 倍人と接触する。	1, 1.5, 2
$\mu_F$	訪日外国人の接触ごとの感染確率は、日本人に比べて $\mu_F$ 倍である。	1

# 分枝過程モデル

# モデル

- 訪日外国人による国内の感染動向への影響を確率過程によって記述
- 前提1：訪日外国人の感染者数は日本国内の未感染者数に比べて極僅か
- 前提2：感染者のうち2次感染を起こすのは一部（二次感染を起こす割合が感染動向の分布に影響）
- 日本人と訪日外国人の2グループを想定
- グループ内・グループ間での実効再生産数に分布を仮定
- 参考：Linton et al. (2021)

Natalie M. Linton, Sung-mok Jung, Hiroshi Nishiura. 2021. Not all fun and games: Potential incidence of SARS-CoV-2 infections during the Tokyo 2020 Olympic Games. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 18(6): 9685-9696.  
doi: 10.3934/mbe.2021474

# 実効再生産数

- グループ  $j$  の感染者一人からのグループ  $i$  への二次感染
- 期待値

$$R_{ij} \propto (1-\theta)n_i + \theta \quad (\text{for } i = j) \\ \propto (1-\theta)n_i \quad (i \neq j)$$

( $n_i$  : グループ  $i$  の人口比)

- 確率母関数
  - 期待値  $R_{ij}$  の負の二項分布
  - 二次感染がまれであるほど ( $k$  が小さいほど) 広い分布を持つ

$$h_j(s_1, \dots, s_p) = \left(1 + \frac{R_{1j}}{k}(1 - s_1)\right)^{-k} \dots \left(1 + \frac{R_{Dj}}{k}(1 - s_D)\right)^{-k} = g_{1j}(s_1) \dots g_{Dj}(s_D)$$

# パラメター設定

パラメター	説明	値
$k$	Dispersion parameter	0.2
$\theta$	Assortativity	0
$R_{ij}$	実効再生産数	Two-Group SIR model のシナリオと整合的になるよう調整
$Gen\_days$	世代時間	7日間
$J_{init}$	シミュレーション開始時の日本人の感染者数	16,800人（2022/06/29 の新規陽性者数と整合的）

# データの出典

# 参考データ

国	一年間の入国者数	平均滞在日数	1回以上接種 (%)	必要回数の接種 (%)	ブースター接種 (%)	自然免疫 (%)	平均消費金額 (円)
Korea	5568997	5.1	87	86	73.7	35.5	76138
Taiwan	4609007	6.1	83.6	78.9	72.8	16.2	118288
China	7995815	7.5	88.78	86.33	54.7	0.1	212810
Hongkong	2252080	6.1	88.3	81.2	59.2	16.7	155951
Thailand	1316885	8.8	80.3	73.1	42	6.8	131457
Singapore	489969	7.5	88.1	87.6	77.2	25.5	173669
Malaysia	497655	9.5	85.7	82.3	49.3	14	133259
Indonesia	410288	12.3	72.8	60	17.5	2.3	131087
Philippines	609549	20.9	61.7	61.7	13.2	3.4	107915
Vietnam	494251	36.1	81.9	79.8	65.1	11	177066
India	173692	16.5	72.6	61.9	3.2	3.2	157244
UK	412848	12	79.1	74	58.5	34	241264
Germany	229430	14.1	76.6	76	68.1	34.1	201483
France	335862	17.1	80.2	78	58.7	45.2	237420
Italy	162074	12.7	85.2	80.4	68	30.8	199450
Spain	129895	13.3	87	85.3	54.3	27.2	221331
Russia	118684	18.8	56	51	10.1	12.4	183015
US	1700805	12.4	78.1	66.6	36.7	26.4	189411
Canada	366758	12	88.7	82.3	57.9	10.5	181795
Australia	610955	12.9	86.7	83.7	53.8	31.9	247868

# 出典

- 対象とする国家の絞り込み
  - 訪日外国人数の多い国について特定・カテゴリ化
  - アジア: 韓国・台湾・中国・香港・タイ・シンガポール・マレーシア・インドネシア・フィリピン・ベトナム・インド
  - ヨーロッパ: イギリス・ドイツ・フランス・イタリア・スペイン・ロシア
  - 北アメリカ: アメリカ・カナダ
  - オーストラリア: オーストラリア
  - その他の国家は“others”として一括化
- 訪日外国人数・滞在期間・平均消費金額: 2019/01～2022/04 について、日本政府観光局の月次データを使用  
(リンク: [https://www.jnto.go.jp/jpn/statistics/visitor\\_trends/](https://www.jnto.go.jp/jpn/statistics/visitor_trends/))
  - 各国ごとにその国からの観光客の平均滞在日数、平均消費金額を取得
- ワクチン接種に関する情報:  
“Partly Vaccinated” / “Fully Vaccinated” / “Boosted”の3カテゴリについて、各国での人口割合を取得  
(リンク: <https://ourworldindata.org/coronavirus>)
  - ワクチンの種類によって、何回目の接種からが「ブースター接種」に当たるのかが異なることを考慮  
例: Johnson & Johnson社製(2回目以降) vs Pfizer社製(3回目以降)
- 自然免疫に関する情報: <https://ourworldindata.org/coronavirus> より感染済みの人数を自然免疫獲得者として考慮

# 感染者入国割合の計算方法

- 新型コロナウイルス感染症に感染している訪日外国人が空港検疫で偽陰性となり、感染性を有したまま入国してしまう割合を  $f\_rate$ （「感染者入国割合」と定義）と設定
- $f\_rate$  の計算方法は Linton et al. (2021) に準拠:

- 元の論文では、オリンピックに関連して入国した外国人に占める感染者数を次のように推計:

$$\frac{N_{\text{foreign}} * (1 - se) * (1 - 0.8 * ve_{2 \text{ doses}}) * C_{\text{world}}}{P_{\text{world}} - (V_{\text{world}} * ve_{\text{overall}}) - \text{recovered}_{\text{world}}}$$

$N$ は外国人の人数、 $se$ は検査の感度、 $ve$ はワクチンの感染予防効果、 $P$ 、 $V$ 、 $recovered$ はそれぞれ総人口、ワクチン接種完了者数、回復者数、 $C$ は $P$ の中での過去7日間の感染者数の総数

- これを参考に、以下のように  $f\_rate$  を計算:

- $f_{\text{rate, country}} = \frac{C_{\text{country}}(1 - se)}{P_{\text{country}}}$

- 仮定:  $se = 0.6$

- $C$ については第六波の期間(2021/12/01 - 2022/3/15)と2021年全体の2パターンを用意

- $f_{\text{rate, country}}$  を国ごとに計算し、各国からの2018年1月~2022年1月の訪日者数によって加重平均をとり、 $f\_rate$  を算出