

感染症のSIRモデルと新型コロナウイルスへの基本戦略

関沢洋一（経済産業研究所）

2020年8月4日

問題意識

- 新型コロナウイルスの登場を受けて、多くの情報に接したが、今一步ピンとこないところがあった。SIRモデルという感染症の基本モデルを知り、このモデルに従ってエクセルで簡単なシュミレーションをするとピンとくるものがあった。
- たとえば、「ここ1～2週間が正念場」、「新型コロナ収束後の経済のV字回復」、「緊急事態宣言(ロックダウン)を解除するのが早すぎた」といった一見疑いようのない表現が怪しげに見えるようになってきた。
- この発表では、SIRモデルを念頭に置きながら新型コロナウイルスへの基本戦略について述べることとした。

感染症の基本法則1

短い期間に複数の人々にうつす(倍々ゲーム)。

仮に5日間で2人にうつすとすると、単純計算では、

(50日後)

$2^{10} = 1024$ 名が感染する。

(100日後)

$2^{20} = 104$ 万8576名が感染する。

(125日後)

$2^{25} = 3355$ 万4432名が感染する。

(留意点)実際には免疫獲得によるブレーキ(基本法則2)がかかる。

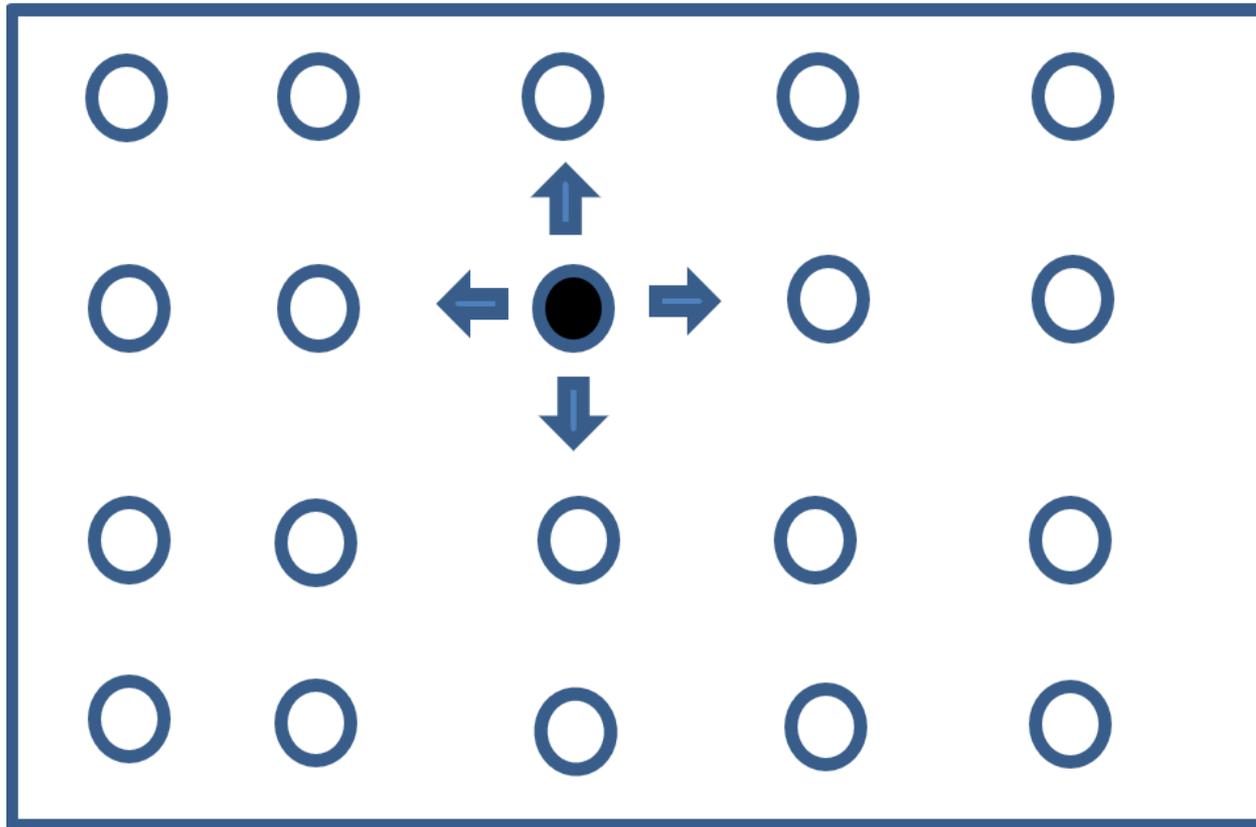
感染症の基本法則2

いったん感染して治ると、少なくとも当面の間は、再び感染することがないし、他人を感染させることもない(免疫ブレーキ)。

(留意点) 登場から半年しか経過していない新型コロナウイルスではまだ証明されていない。過去の経験則。

基本原則1(倍々ゲーム)が働いて、感染が急速に進む。

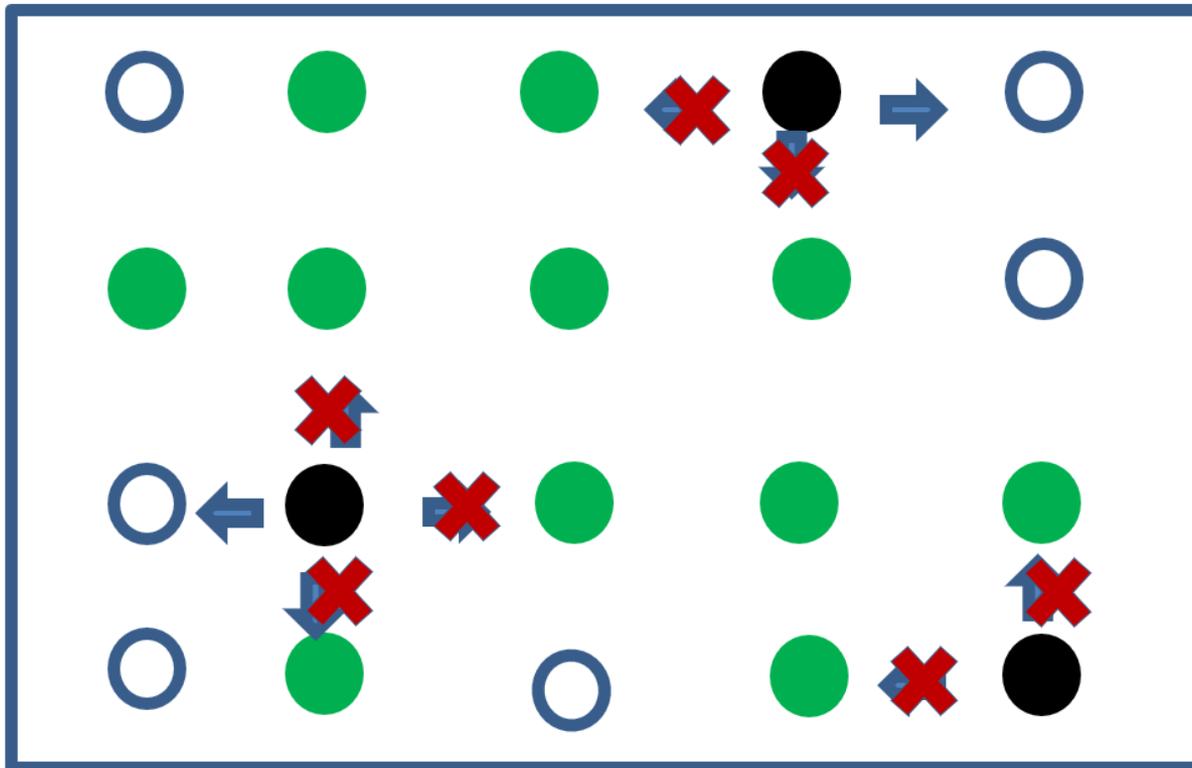
図1 感染初期



○は未感染者。●は感染者。●は回復者。

基本原則2(免疫ブレーキ)が働いて、感染が進まなくなる。

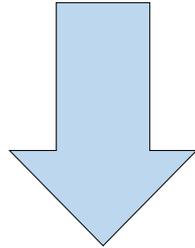
図2 感染が既に進行



○は未感染者。●は感染者。●は回復者。

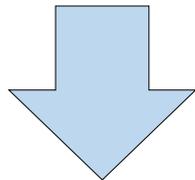
SIRモデル

S (susceptible) : 未感染で感染しうる人々



$$\beta(\text{1人が1日にうつす人数}) \times I \times S / \text{全人口}$$

I (infected) : 現在感染していて人にうつす人々

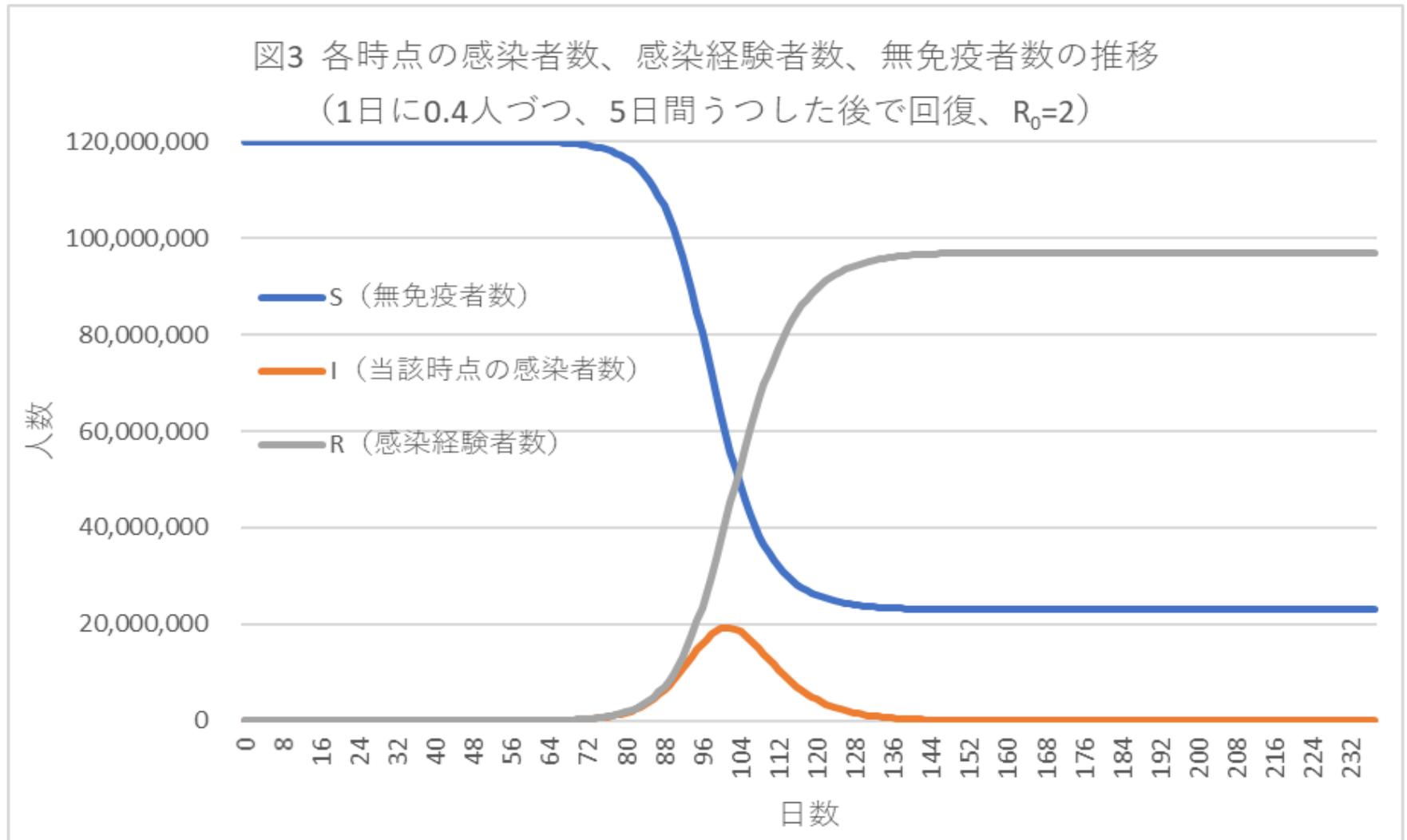


$$1 / \gamma \text{ (ガンマ) 日で回復する}$$

R (recovered) : 感染から回復し、当面の間は感染しないし、他人にもうつさない人々

本発表の基本モデルでは $\beta=0.4$ 、 $\gamma=0.2$ （5日で回復）とした。基本再生産数（ R_0 ）は $\beta/\gamma=2$ で、誰も免疫がない状態では1人が5日間で2人にうつして回復する。

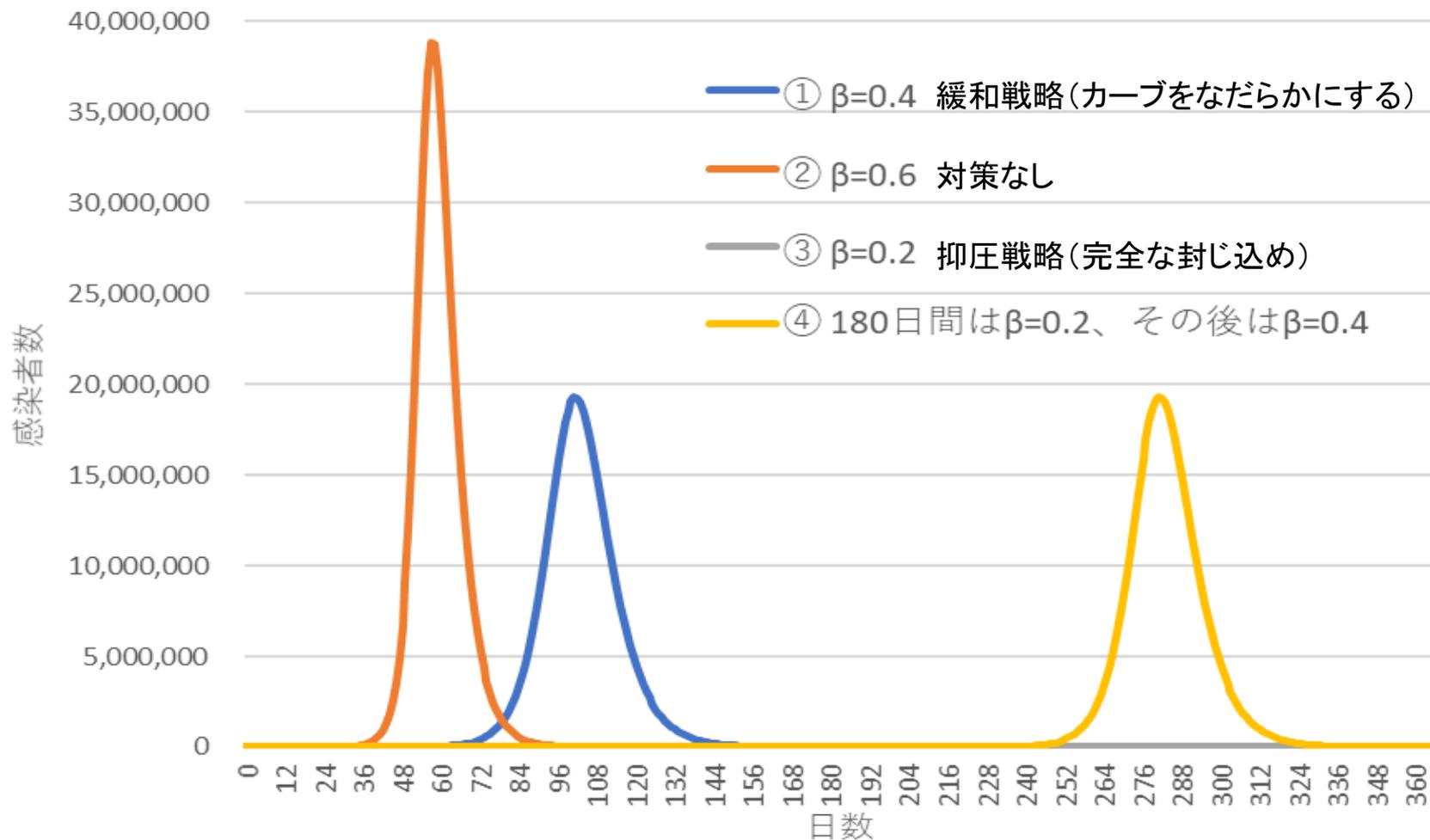
SIRモデルのグラフ（全体像）



(出典)関沢[1]

SIRモデルのグラフ（4つの戦略毎）

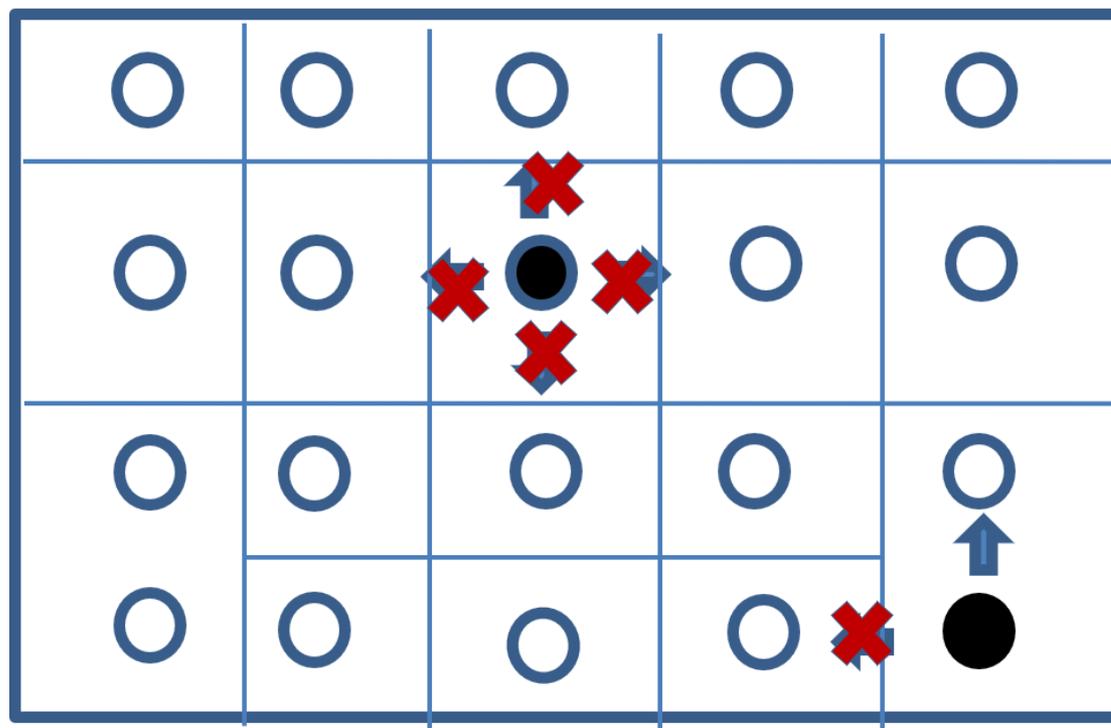
図4 4つのパターンにおける各時点の感染者数



(出典)関沢[1]に加筆した。

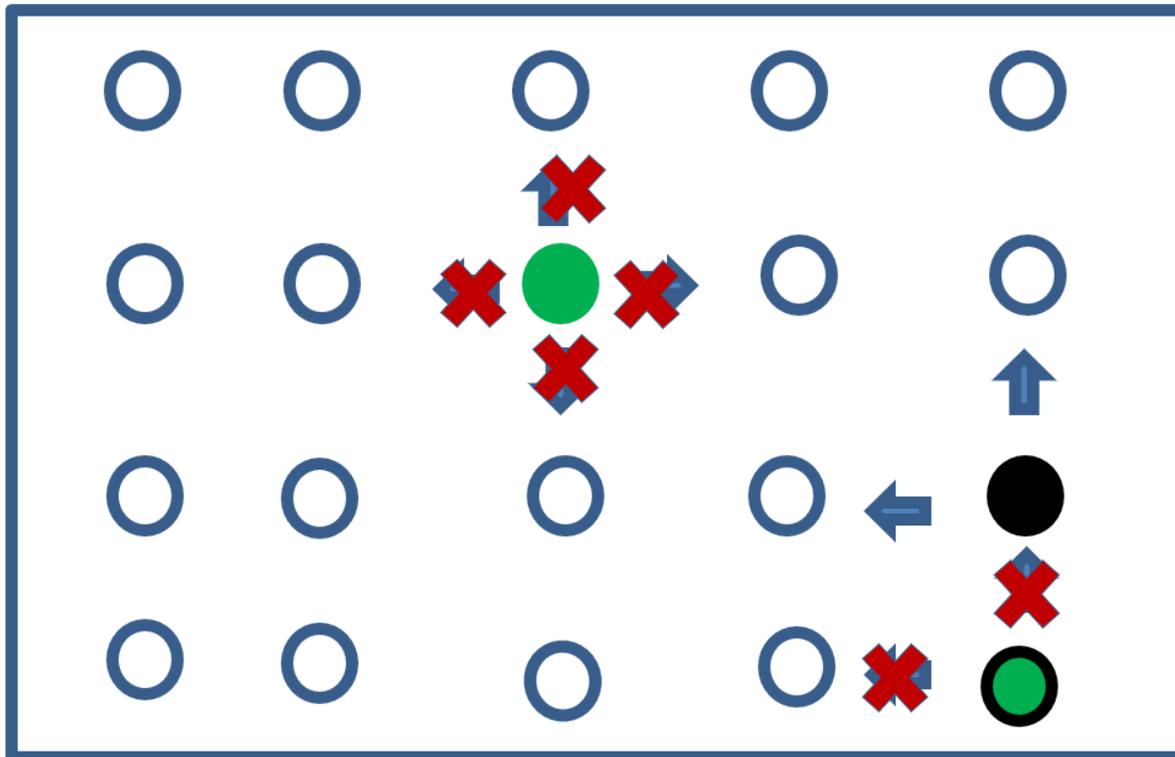
緊急事態宣言(ロックダウン)の意味

図5 壁を作って守る



免疫がない状態で緊急事態宣言を解除すると？

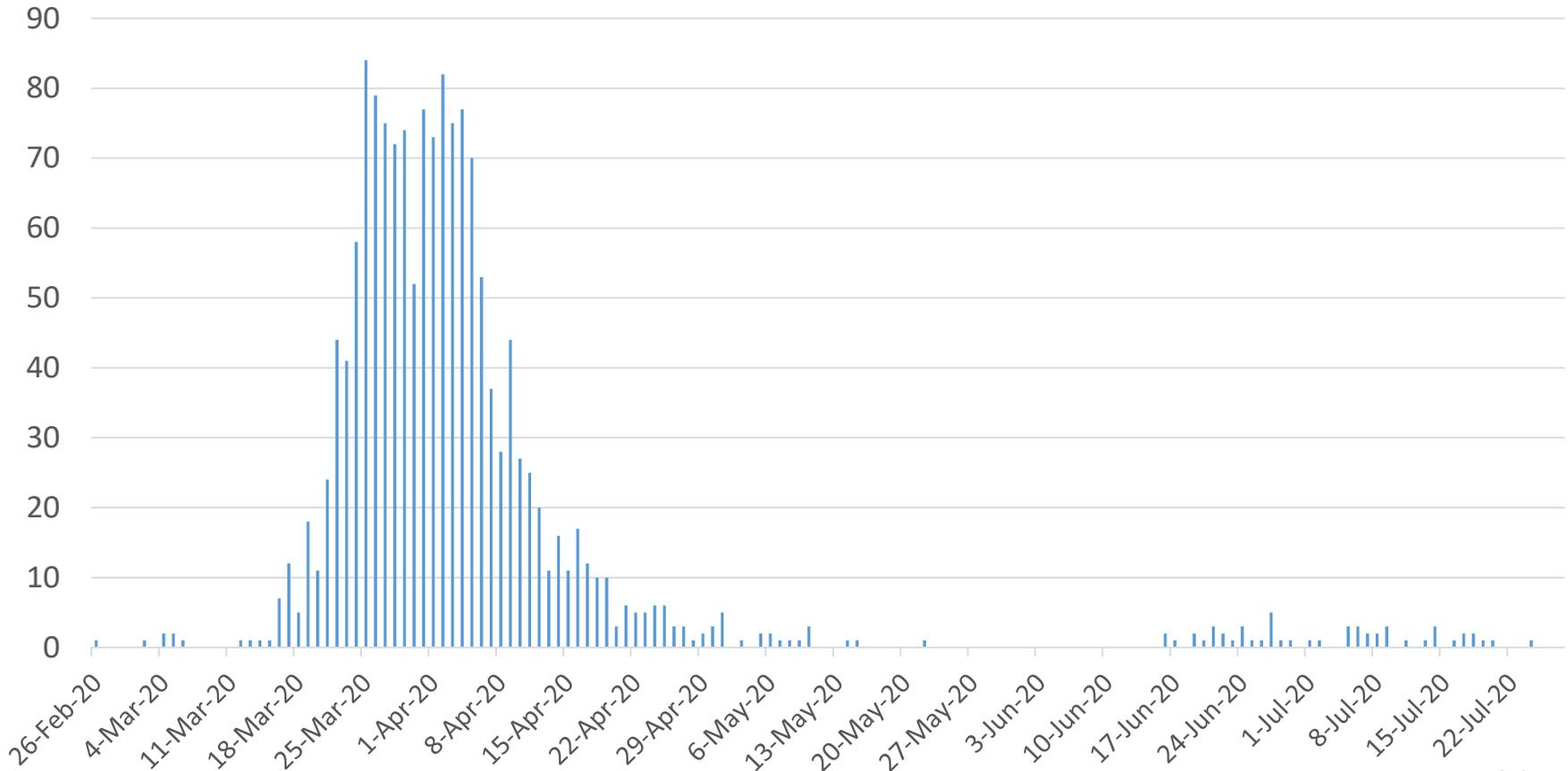
図6 壁が消えて倍々ゲーム再開



抑圧戦略(感染の封じ込め)

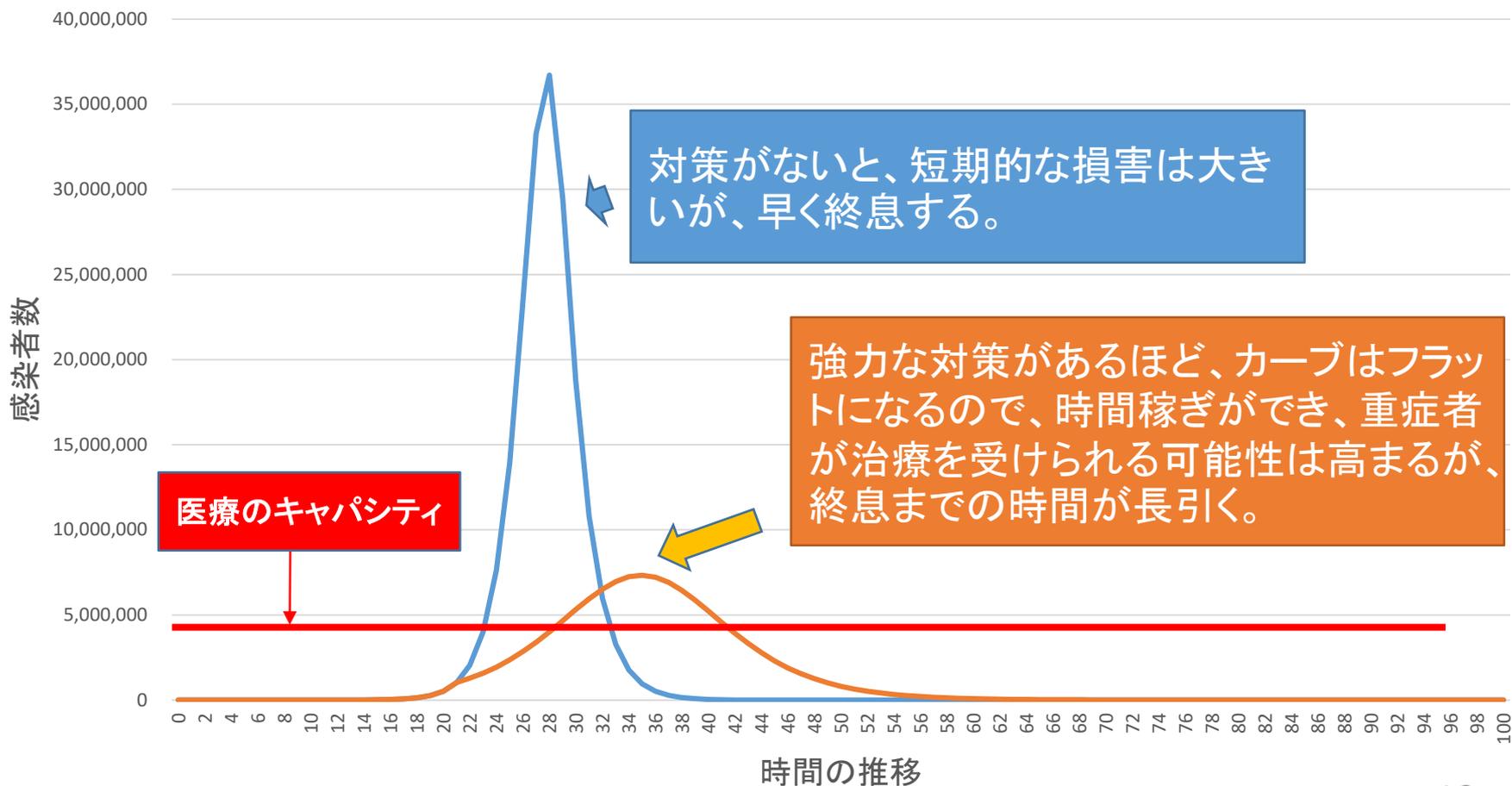
強力な初期対策で感染者数をゼロに近づけてその状態を維持する。免疫がない人々がほとんどなので、ワクチンができるまでは極めて強力な国内監視と入国制限が必要。

ニュージーランドの新規感染者数の推移



緩和戦略

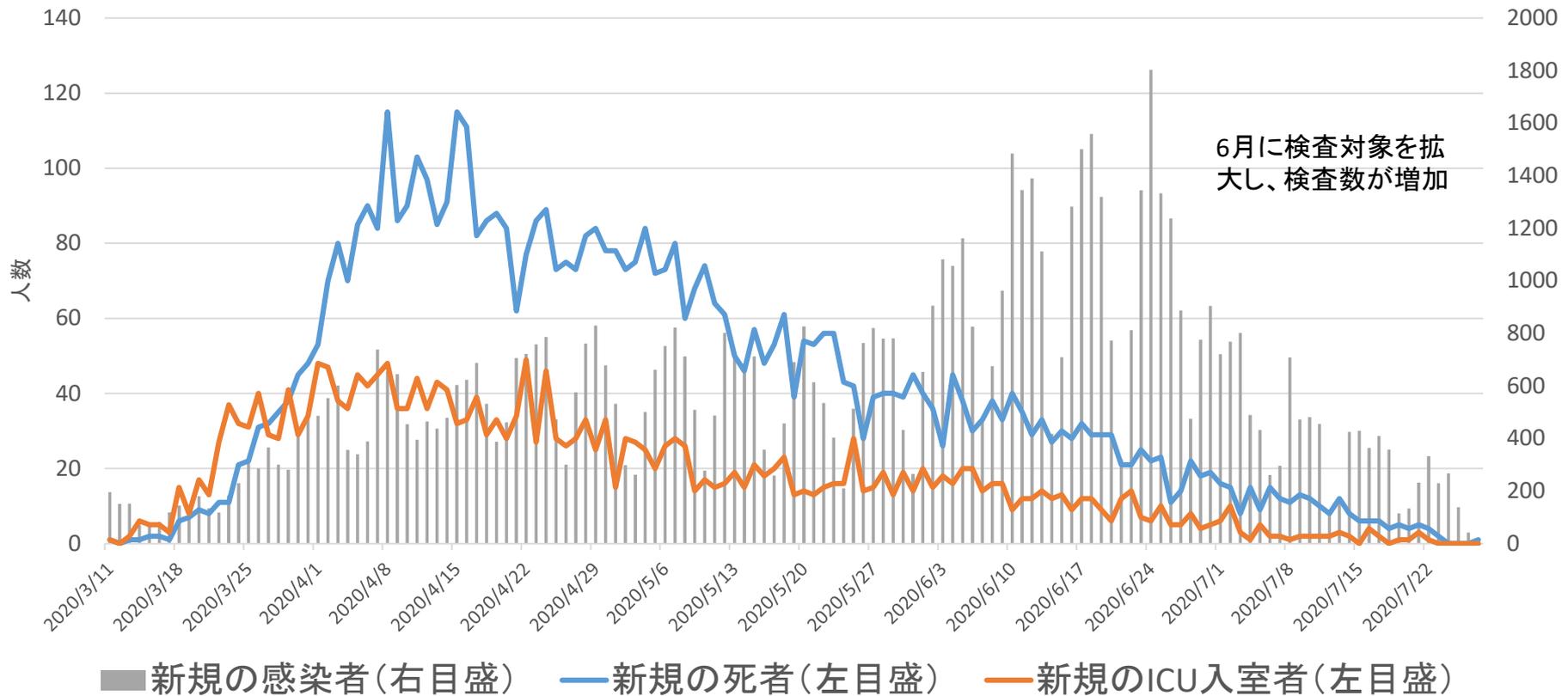
1人がうつす人数を減らすことによって、感染速度を抑え、感染ピークを下げて、医療のキャパシティ以下に医療需要を抑えることが主たる目的。感染を完全に止めようとするしない。



スウェーデンの対応

スウェーデンは持続可能性を重視してロックダウンを行わず、緩和戦略をとった。医療崩壊は起きず、感染者数はピークを超えて集団免疫を達成した可能性があるが、高齢者を守り切れなかったことが主因で死者数は他の北欧諸国より多かったため、内外で論争になった。

スウェーデンの新型コロナウイルスの状況

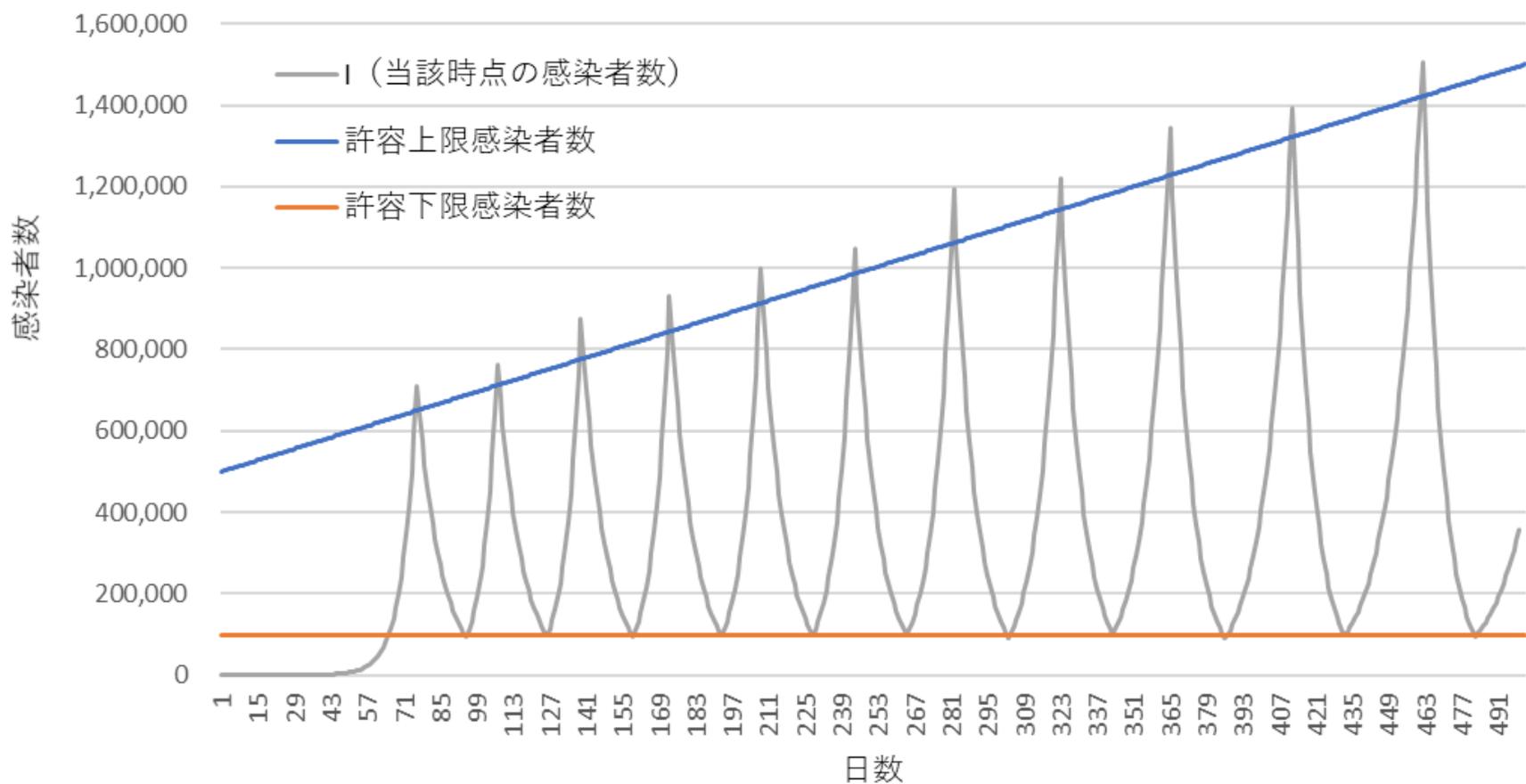


(出典) The Public Health Agency of Sweden

ジグザグ戦略

医療崩壊が起きない範囲で社会と経済を回すために、強力な対策と緩い対策を交互に繰り返す。

ジグザグ戦略における各時点の感染者数の推移



SIRモデルで説明できない現実

基本的なSIRモデルでは、初期時点では全ての人々が感染していない、ある程度の高い基本再生産数(R_0)を設定して試算している($R_0=2.5$)などの単純化がなされている。

SIRモデルどおりであれば、日本では既に数千万人の感染者がいてもおかしくないが、そうは見えない。日本で感染者数が少ないのはなぜか。

(仮説1) 感染しにくい人々が多い(風邪のコロナウイルスによる交差免疫[2]、BCGなどが原因)。たとえば、2009年の新型インフルエンザで大人は感染しにくかった。

(仮説2) 実は多くの人々が既に感染してしまった[3, 4]。

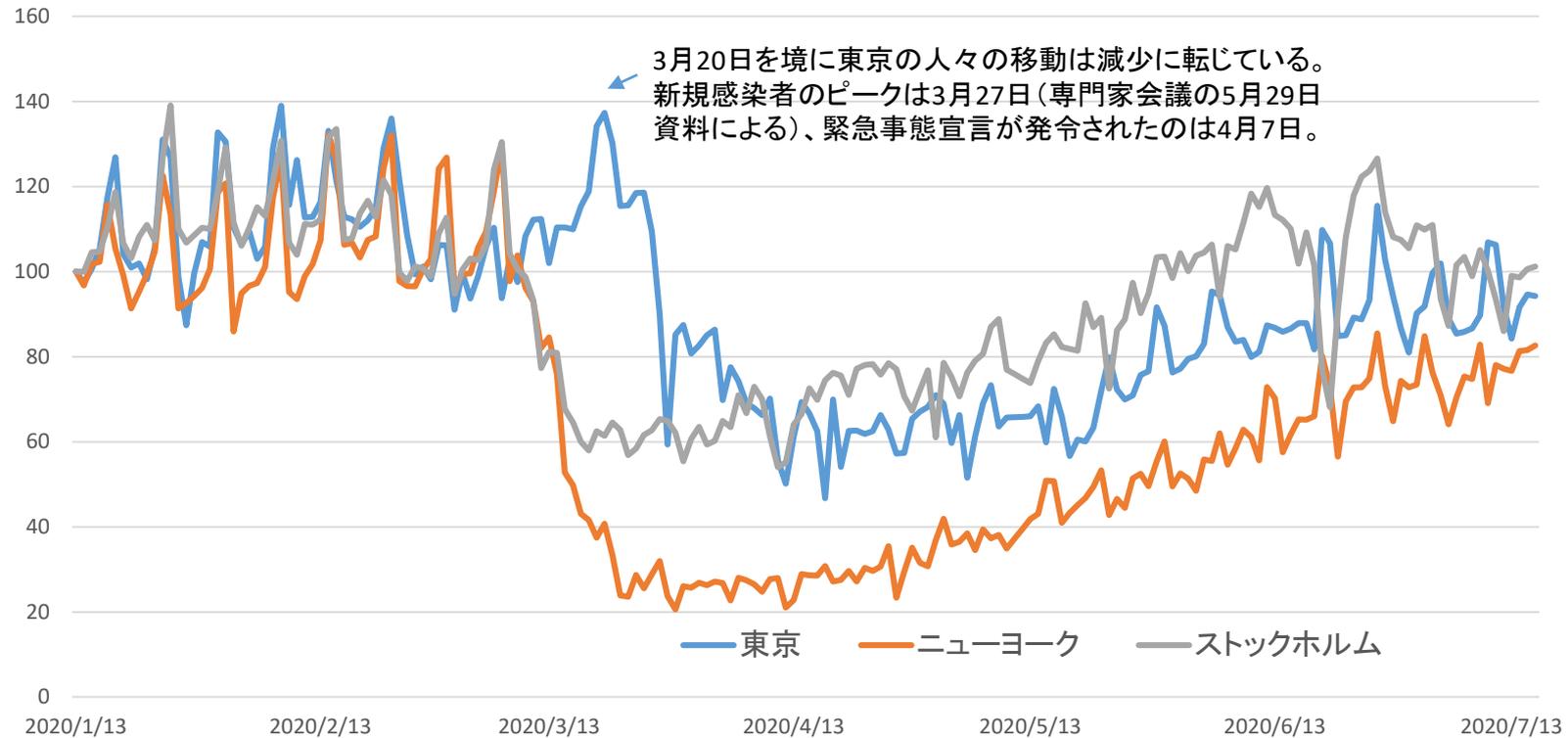
(仮説3) 東アジアの人々の生活様式では感染しにくい(ハグや握手の習慣がない、マスクへの抵抗感が少ないなど)。

(仮説4) 対策が効果的だった。対策をやめれば他の国々と同じくらい感染者数は増える。

東京・ニューヨーク・ストックホルムの人々の移動の変化

3都市で比べると、人々の移動の増減が感染者数の増減に先行している傾向はありそうだが(特に東京)、感染者数の水準とはあまり関係なさそう(7月28日までの死亡者数は東京が328名、ニューヨークが22970名、ストックホルムが2384名)。

東京・ニューヨーク・ストックホルムの移動傾向
(1月13日が100、Appleのデータ)



(出典及び注) Appleの移動傾向レポート(<https://www.apple.com/covid19/mobility>)から作成。Driving, walking, transitの平均値をとった。このデータがCOVID-19の感染状況の先行指標となりうることについては、Kurita et al. [5], Nouvellet et al. [6]を参照のこと。

今後の見通し(全くの私見)

- 東アジア以外の国々の多くでは感染が蔓延する結果(意図せざる緩和戦略)、感染の大きな波は終息して平常な状態に戻るのは早いかもしれない(今年中ぐらいか)。
- 日本以外の東アジアの国・地域は感染をある程度コントロールできているために(抑圧戦略に近い)、逆に終息への時間が長引くかもしれない(治療薬やワクチン次第)。
- 日本はよくわからない。感染が蔓延して止められなくなれば一時的な被害は大きい但最终は早くなりそう。生活習慣や対策や自粛が功を奏して感染をコントロールできれば逆説的に長期間の対応が必要になる可能性。

引用文献

1. 関沢洋一「感染症のSIRモデルと新型コロナウイルスへの基本戦略」、小林慶一郎・森川正之編『コロナ危機の経済学：提言と分析』日本経済新聞社出版; 2020. pp.187-202.
2. Lourenco J, Pinotti F, Thompson C, Gupta S. The impact of host resistance on cumulative mortality and the threshold of herd immunity for SARS-CoV-2. medRxiv. 2020:2020.07.15.20154294. doi: 10.1101/2020.07.15.20154294.
3. 高橋泰・武藤真祐・加藤雅之. 新型コロナの実態予測と今後に向けた提言 下. 社会保険旬報. 2020;2788.
4. Kamikubo Y, Takahashi A. Epidemiological Tools that Predict Partial Herd Immunity to SARS Coronavirus 2. medRxiv. 2020:2020.03.25.20043679. doi: 10.1101/2020.03.25.20043679.
5. Kurita J, Sugawara T, Ohkusa Y. NTT Docomo and Apple mobility data compared as countermeasures against COVID-19 outbreak in Japan. medRxiv. 2020:2020.05.01.20087155. doi: 10.1101/2020.05.01.20087155.
6. Nouvellet P, Bhatia S, Cori A, Ainslie K, Baguelin M, Bhatt S, et al. Report 26: Reduction in mobility and COVID-19 transmission. London: Imperial College London, 2020.