

## 感染症数理モデルに基づく分析に関する補足資料

株式会社三菱総合研究所

## 1. 背景

新型コロナウイルスに関する国際的な関心の高さを反映して、国内外の様々な研究機関や公的機関が数理モデルを用いた分析を公開している。現時点でピアレビューされた論文は少ないが、Walker, et al. (※1) では、インペリアル・カレッジ・ロンドンによる新型コロナウイルスに関する一連の分析の一部として、人口構成を考慮した SEIR (Susceptible-Exposed-Infectious-Recovered) モデルを用いて世界全体を国別に分析し、対策効果や必要となる医療リソース規模を試算している。Kissler, et al. (※2) では、季節変動を考慮した SEIR モデルを用いて、今後数年間をかけて医療機能を確保しつつ集団免疫に至るまでの対策シナリオを議論している。Iwata K, Miyakoshi C (※3) では、確率的 SEIR モデルを用いて、感染に関する各種パラメータの不確実性を考慮した場合にあり得る感染シナリオについて議論している。

## 2. モデル

本分析では、各国の感染拡大の状況を、最も一般的に用いられている感染症数理モデルの一つである SEIR モデルで表現することとした。同モデルでは、ある地理的範囲の人口を、感染前の状態 (Susceptible)、感染症に曝露したものの他人への感染性を有さない状態 (Exposed)、他者への感染性を有する状態 (Infectious)、回復して免疫を獲得あるいは死亡した状態 (Removed または Recovered) の 4 種類のカテゴリに分類し、感染の進展に伴うこれら 4 変数の時間的な変化を以下の常微分方程式で表現する。

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t),$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \sigma E(t),$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \sigma E(t) - \gamma I(t),$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t),$$

ここで、 $t$  は経過時間 (日)、 $\beta$  は感染の速さに関する係数、 $\sigma$  は潜伏期間から感染状態への移行係数、 $\gamma$  は回復または死亡状態への移行係数である。本評価で対象とした期間は数カ月

間であるため、期間中の人口変化は考慮せず総人口は一定とみなした。また、 $S, E, I, R$ は国単位で一つの数値を持つスカラー変数として取り扱った。

SEIR モデルが有するパラメータのうち、 $\beta$ はウイルス自体が有する感染能力の強さに加えて、各国での人同士の接触の仕方、およびそれを規定する社会経済的・文化的な状況に左右される。従って、この係数は国ごと・対策の進展ごとに固有の数値を有すると考え、後述するパラメータ推計の対象とした。 $\sigma$ は概ねウイルスの特性により定まると考え、Walker, et al. (※1)による潜伏期間の平均 4.58 日の設定を参考に、国によらず $\sigma$ の逆数が平均 4.6 日、標準偏差 2 日のガンマ分布に従うと設定した。感染状態からの回復を示す $\gamma$ については、今回分析した対象国および分析期間においては十分な医療水準を持ち、医療資源の逼迫による治療能力の低下は生じていないと考え、Kisser, et al. (※2) および Walker, et al. (※1)において設定されている感染期間の平均値 5 日を参考に、国によらず $\gamma$ の逆数が平均 5 日、標準偏差 2 日のガンマ分布に従うと設定した。

### 3. 用いたデータ

既報の「新型コロナウイルス各国施策分析レポート 3：致死率の分析からみた感染者数の公表値と検査状況」において分析した累計感染者数（レポート 3 において「公表されている感染者数」（※4）と示されている値）のうち、ドイツ、アイスランド、シンガポールを用いた。

### 4. 分析手法

数値的な分析のため、SEIR モデルを時間ステップ 1 日により離散化し、4 次の Runge-Kutta 法による数値積分を行った。

推計された各日における感染者および回復者・死者（ $I$ と $R$ の和）の時系列を 10 日毎の時系列セグメントに分割し、各セグメントの  $I+R$  のデータとモデル数値が整合するように、最小二乗法によりパラメータ  $\beta$  および時系列の開始時刻をフィッティングした。 $\beta$  に関しては Levenberg-Marquardt 法による最適化、時系列の開始時刻は総当り法を用いた。初期値は  $S = 1 - 10^{-7}, E = 10^{-7}, I = R = 0$  (人口の 1,000 万分の 1 の割合で潜伏期間の人が存在。例えば 8000 万人の人口を持つ国であれば、8 人が潜伏期間として存在) として固定した。

### 5. 分析結果

ドイツ、アイスランド、シンガポールにおける期間毎の  $\beta$  の推定結果を表 1 に示す。また、 $\beta$  と  $\gamma$  の比で与えられ、ある時刻  $t$  における感染者が二次感染をさせる平均的な人数に相当する実効再生産数 ( $R_t$ ) も同表に併記した。対策の進展に伴い基本的には  $\beta$  が低減していることが確認される。フィッティングした SEIR モデルにより得られた累積感染者数 ( $I+R$ )

及び感染者数 ( $I$ ) の時系列を図 1 に示す。  $\sigma$  および  $\gamma$  に含まれる不確実性幅を考慮するため、乱数によりこれらのパラメータを変化させて 2.5%~97.5% の信頼区間を併記している。現時点の分析では、係数  $\beta$  をデータをもとに推計したことによる不確実性を考慮していないことに留意が必要である。これを考慮することにより、さらに不確実性幅が大きくなることが想定される。

表 1  $\beta$  の推計結果

国	期間	$\beta$ の推定値	$R_t = \beta/\gamma$
ドイツ	2/25-3/5	1.38	6.9
	3/6-3/15	0.86	4.3
	3/16-3/25	0.69	3.4
	3/26-4/4	0.15	0.8
アイスランド	3/1-3/10	0.68	3.4
	3/11-3/20	0.64	3.2
	3/21-3/30	0.30	1.5
	3/31-4/9	0.08	0.4
シンガポール	1/23-2/1	0.79	3.9
	2/2-2/11	0.33	1.7
	2/12-2/21	0.28	1.4
	2/22-3/2	0.00	0.0
	3/3-3/12	0.70	3.5
	3/13-3/22	0.47	2.4
	3/23-4/1	0.35	1.8

出所：公表資料※4 より三菱総合研究所作成

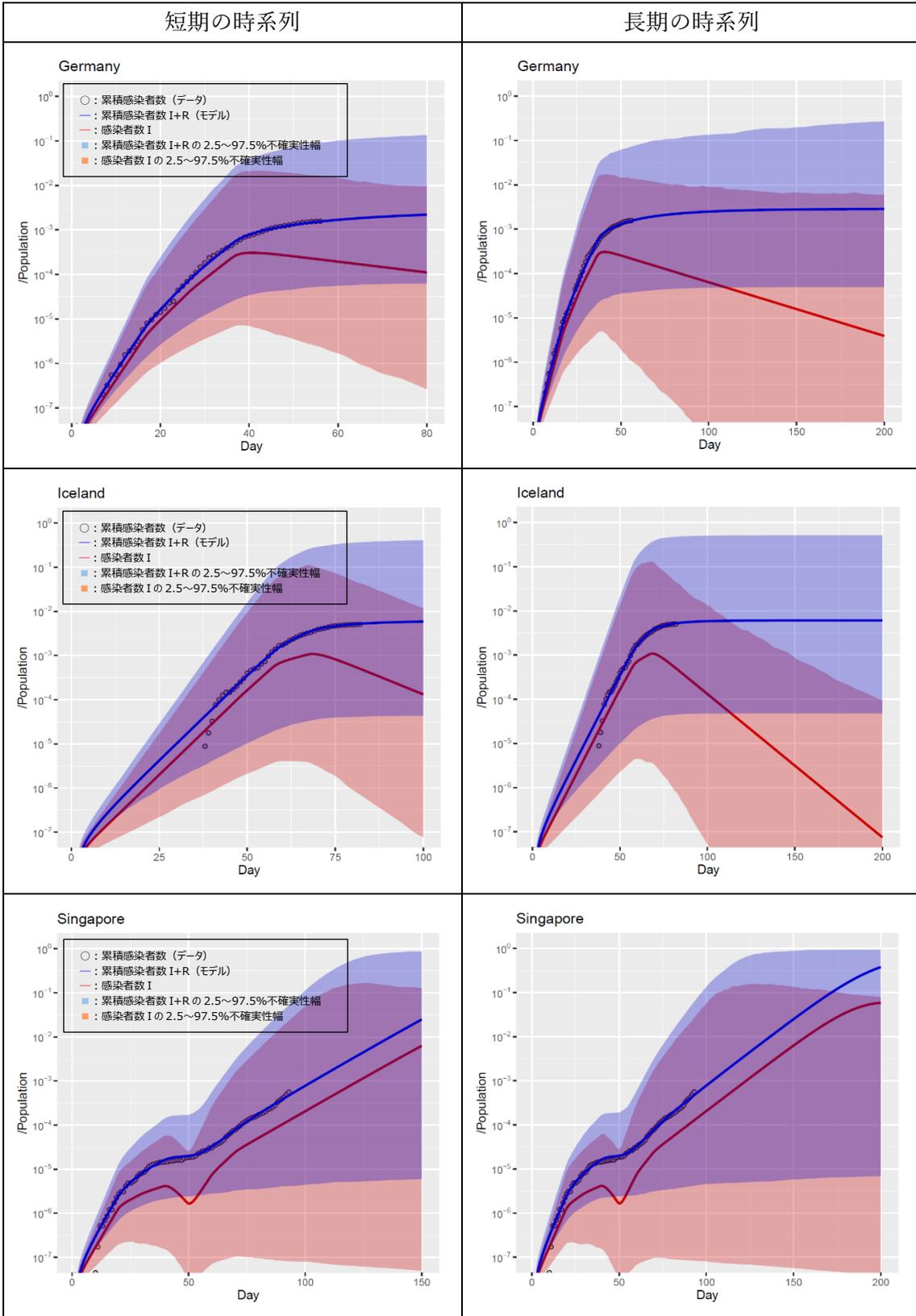


図 1 累積感染者へのフィッティング結果と不確実性幅  
(ドイツ、アイスランド、シンガポール)

出所：公表資料※4 より三菱総合研究所作成

(※1) Walker PG, et al. (2020) Report 12: The Global Impact of COVID-19 and Strategies for Mitigation and Suppression. MRC Centre for Global Infectious Disease Analysis  
<https://www.imperial.ac.uk/mrc-global-infectious-disease-analysis/covid-19/report-12-global-impact-covid-19/> (閲覧日：2020年4月22日)

(※2) Kissler SM, et al. (2020) Projecting the transmission dynamics of SARS-CoV-2 through the postpandemic period. Science

(※3) Iwata K, Miyakoshi C. (2020) A Simulation on Potential Secondary Spread of Novel Coronavirus in an Exported Country Using a Stochastic Epidemic SEIR Model. J Clin Med

(※4) JHU CSSE 「2019 Novel Coronavirus COVID-19 (2019-nCoV) Data Repository by Johns Hopkins CSSE」 地域別・時点別の感染者 (Confirmed)・死亡者 (Deaths) データ  
[https://github.com/CSSEGISandData/COVID-19/tree/master/csse\\_covid\\_19\\_data/csse\\_covid\\_19\\_time\\_series](https://github.com/CSSEGISandData/COVID-19/tree/master/csse_covid_19_data/csse_covid_19_time_series) (閲覧日：2020年4月20日)