

# 基礎マクロ：疫学 (マクロ経済学)

日野将志

一橋大学

2021

# コロナの経済への影響

疫学マクロ

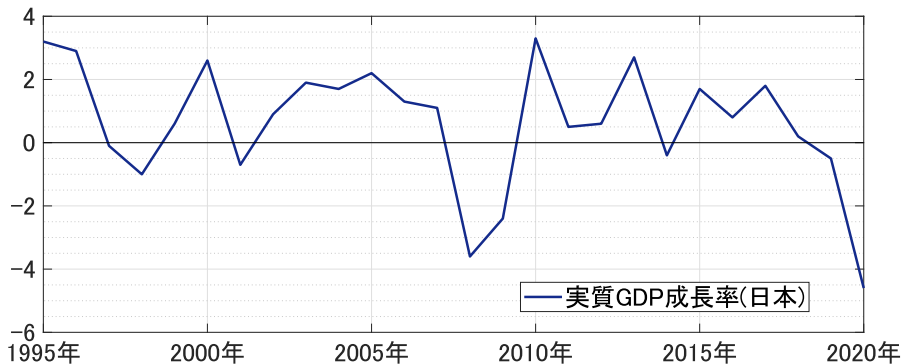
日野将志

純粋な疫学モデル

学マクロ経済学

田・藤井論文

論：コーディング



「昨年度の GDP -4.6 % リーマンショックを超える最大の下落」

(例：<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20210518/k10013036691000.html>)

## 緊急事態宣言の大雑把な復習

- ▶ 1回目：20年4月上旬-5月下旬
- ▶ 2回目：21年1月上旬-3月下旬
- ▶ 3回目：21年4月下旬-ongoing(?)

(※地域ごとに差異あり)

⇒ Q. なんで緊急事態宣言？ どのような効果？

(潜在的に) 重要なトレードオフ：健康 (人命) vs 経済  
緊急事態宣言を...

- ▶ 強化すると，人命を多く救えるが，経済損失大
- ▶ 弱めると，経済損失は小さい (?) が，健康被害大

実験は出来ない．⇒ モデルなら実験できる！

⇒ マクロ経済学と疫学が融合される必要があった

でも，ここでは疫学のモデルを主に教えます

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

ロックダウンの役割

ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

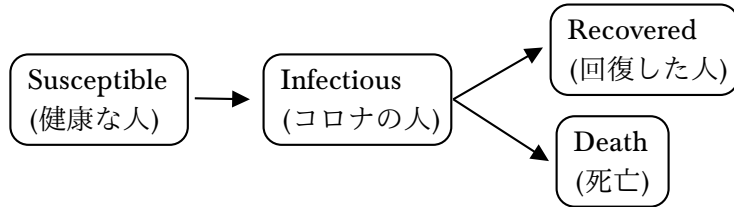
## 純粋な疫学モデル：SIRD モデル

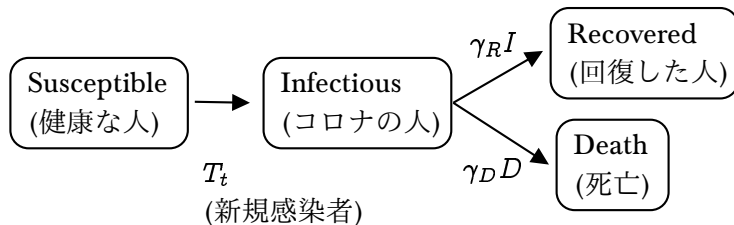
## 最も単純な SIRD モデル

- ▶  $S_t$ : Susceptible (感染前). 健康で免疫を持っていない人
- ▶  $I_t$ : Infectious(感染中). 感染していて、他の人にうつす
- ▶  $R_t$ : Recovered (回復済み). 回復して免疫を獲得した人
- ▶  $D_t$ : Death (死亡).

人口は1と基準化:  $1 = S_t + I_t + R_t + D_t$

この四つの状態を動く.





SIRD モデルは次の式からなる ( $T_t(\cdot)$  は次頁)

$$S_{t+1} = S_t - \underbrace{T_t(\cdot)}_{\text{新規感染者}}$$

$$I_{t+1} = I_t + T_t(\cdot) - \underbrace{\gamma_R I_t}_{\text{次期に回復 } (\gamma_R \in (0,1))} - \underbrace{\gamma_D I_t}_{\text{次期に死亡 } (\gamma_D \in (0,1))}$$

$$R_{t+1} = R_t + \gamma_R I_t$$

$$D_{t+1} = D_t + \gamma_D I_t$$

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

ロックダウンの役割

ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

ロックダウンの役割

ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

$$S_{t+1} = S_t - \underbrace{T_t(\cdot)}_{\text{新規感染者}}$$

$$I_{t+1} = I_t + T_t(\cdot) - \underbrace{\gamma_R I_t}_{\text{次期に回復 } (\gamma_R \in (0,1))} - \underbrace{\gamma_D I_t}_{\text{次期に死亡 } (\gamma_D \in (0,1))}$$

$$R_{t+1} = R_t + \gamma_R I_t$$

$$D_{t+1} = D_t + \gamma_D I_t$$

この中で、 $T_t(\cdot)$  が重要.

$$T_t = \underbrace{\beta}_{\text{感染確率}} \times \underbrace{I_t \times S_t}_{\text{感染者と健康な人が多いと感染拡大}}$$



# $T_t$ の関数形の意味

$$T_t = \beta I_t S_t$$

この  $T_t$  は 2 次同次 (収穫逓増). つまり  $\lambda > 0$  に対して,

$$\lambda^2 T_t = \beta (\lambda I_t) (\lambda S_t)$$

意味：健康で無免疫な人  $S_t$  と感染者  $I_t$  が 2 倍ずつになったら,  $T_t$  は 4 倍  
⇒ 指数的增长 (感染爆発) する

(オプショナル：  $T_t = \beta I_t^\alpha S_t^\beta$ ,  $\alpha + \beta > 1$  等としても良い)

$T_t$  を代入した SIRD モデル

$$S_{t+1} = S_t - \underbrace{\beta I_t S_t}_{\text{新規感染者}}$$

$$I_{t+1} = I_t + \beta S_t I_t - \underbrace{\gamma_R I_t}_{\text{次期に回復}} - \underbrace{\gamma_D I_t}_{\text{次期に死亡}}$$

$$R_{t+1} = R_t + \gamma_R I_t$$

$$D_{t+1} = D_t + \gamma_D I_t$$

連立の差分方程式 (シミュレーションは超簡単！)

経済学の観点からは、ソローモデルと大差ない

シミュレーションをするためにはパラメータを決める必要がある.

- ▶ モデルの期間：週

$t \rightarrow t + 1$  は1週間

- ▶  $I_0 > 0$

初期の感染者数. 初期感染者  $I_0$  が0だと, だれも永遠に感染しない.

- ▶  $\gamma_D = 0.005 \times 7/18$ : 感染した人の一週間以内の死亡率

感染者のうち 0.5% が死亡. 平均 18 日感染が続く. これを週にするため, 7 で割る.

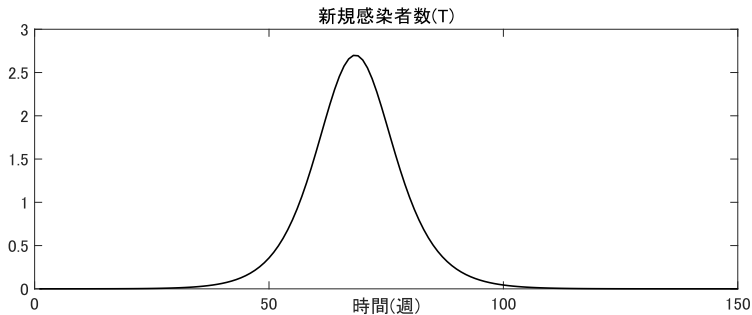
- ▶  $\gamma_R = (1 - 0.005) \times 7/18$

感染者のうち 99.5% が回復.

- ▶  $\beta \in (0.5, 0.5852)$ : 感染確率

感染者  $I_t$  と非感染者  $S_t$  が会ったときに感染する確率. まだ未知数...

政府が何もしない場合：



- ▶ 時間が経ってから (50 週後に), 新規感染者数  $T_t$  が急増

# シミュレーション結果：他の変数

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

ロックダウンの役割

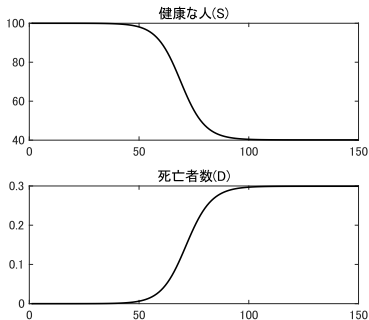
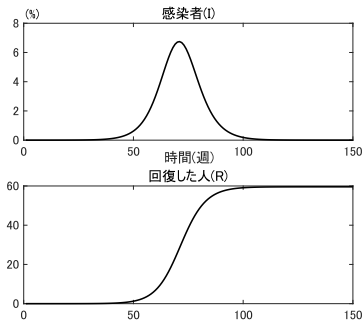
ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

政府が何もしない場合：



- ▶ 100 週後 (2 年後) に人口の 6 割程度が感染して落ち着く (集団免疫の獲得).
  - ▶ 人口の 0.3%  $\approx$  36 万人死亡
  - ▶ 西浦教授 (2020/4 月) 「42 万人死ぬ」

## 現実における緊急事態宣言の役割

- ▶ 人と人が接触する可能性を減らす
- ▶ 例
  - ▶ 飲食店の閉店・自粛要請
  - ▶ 外出抑制

## モデルにおける緊急事態宣言

- ▶ 感染者も非感染者も一律に出会わなくなる

$$T_t = \beta((1 - L)I_t)((1 - L)S_t)$$

$L \in (0, 1)$  : ロックダウンの強さを表すパラメータ

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

ロックダウンの役割

ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

## 疫学モデルの仮想実験

# ロックダウンの仮想実験：ロックダウンの厳格さ

仮想実験できるのがモデル分析の強み！

ロックダウンに関して次のような疑問

(1) ロックダウン  $L$  は人命を救うか？

- ▶ やるべき実験：異なる  $L$  のシミュレーション比較
- ▶ 例：ロックダウンなし ( $L = 0.0$ ) とロックダウンあり ( $L = 0.2$ )
- ▶ コード：[SIR\\_lockdown.m](#)

(2) 厳格なロックダウンは効果的か？

- ▶ 例えば、「2 倍厳しいロックダウンは、2 倍の人命を救う」か？
- ▶ やるべき実験：異なる  $L$  のシミュレーション比較
- ▶ 例： $L = 0, 0.2, 0.4$  の比較など
- ▶ コード：[SIR\\_lockdown\\_strict.m](#)

▶ 効率的なロックダウン？

- ▶ 検査して感染者  $I_t$  のみ隔離



# ロックダウンの仮想実験：ロックダウンのやり方

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

ロックダウンの役割

ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

同じロックダウンの厳しさ ( $L$ ) でも実行方法は多数！

(3) ロックダウンのタイミングはいつが良い？早い？感染拡大期？遅くても良い？

- ▶ やるべき実験：異なるタイミングでのロックダウン
- ▶ コード：[SIR\\_lockdown\\_timing.m](#)

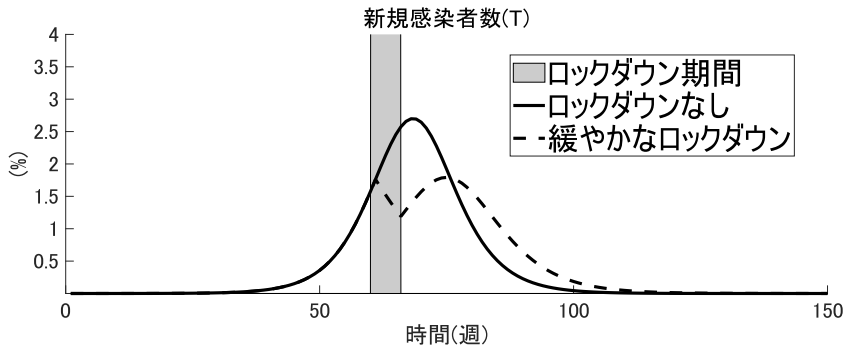
(4) ロックダウンの期間はどれくらいが良い？

- ▶ やるべき実験：短期間と長期間のロックダウン
- ▶ コード：[SIR\\_lockdown\\_long.m](#)

etc...

# 実験 1：ロックダウンの役割の検証

実験内容： $L = 0$  と  $L = 0.2$  の比較



- ▶ ロックダウンによって、新規感染者を遅らせられる
- ▶ ロックダウンによって、新規感染者数を減らせる

# 実験 1 : ロックダウンの役割

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

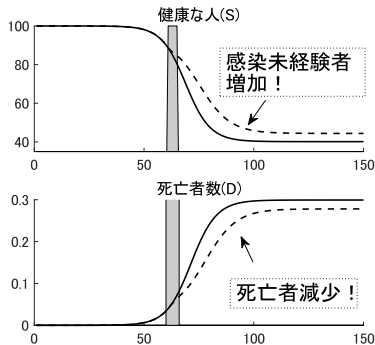
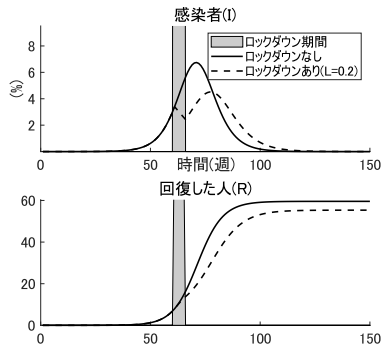
ロックダウンの役割

ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング



- ▶ 感染する人を減らせる
- ▶ 死亡者も減る

⇒ ロックダウンは効果的な手段！

# ロックダウンの役割のまとめ

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

ロックダウンの役割

ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

ロックダウンは次のような効果を持つ

- ▶ 感染する割合  $1 - S_t (= I_t + R_t + D_t)$  を減らせる
- ▶ 死亡者数  $D_t$  も減らせる

ロックダウンは効果的な手段！  $\Rightarrow$  ただの時間稼ぎではない

疑問：ロックダウンを2倍にすると、死亡者減を倍増できる？

(数学的には、「ロックダウンの効果は線形なのか?」)

# 実験2：厳格なロックダウンの効果

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

ロックダウンの役割

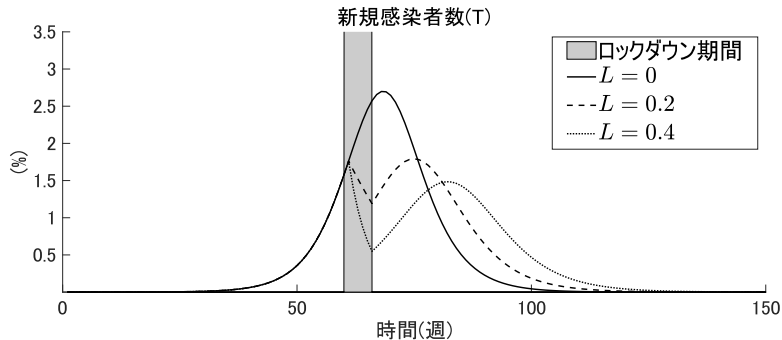
ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

実験内容： $L = 0$ ,  $L = 0.2$ ,  $L = 0.4$  の比較



- ▶ ロックダウン期間中，新規感染者は激減

# 実験2：厳格なロックダウンの効果

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

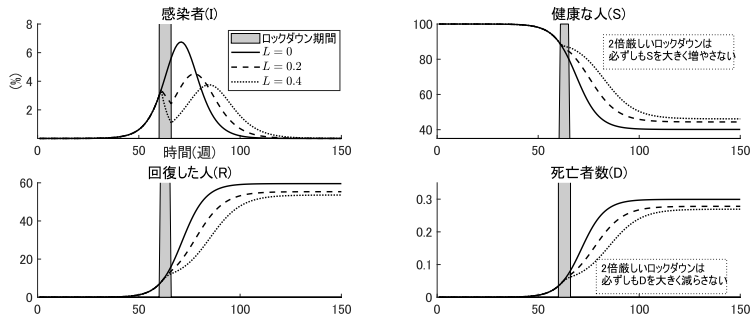
ロックダウンの役割

ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング



- ▶ ロックダウン時と直後は、厳格なロックダウンは効果的
- ▶ ロックダウンから時間が経つと、厳格なロックダウンの効果は消失していく

# 効率的なロックダウン：「検査増」

小林慶一郎教授「検査数を増やすべき！」

## ▶ 考え方

- ▶ ロックダウンの経済的損失が大きい原因は健常者  $S_t$  も巻き込まれるから
- ▶  $I_t$  だけを見つけて隔離すれば社会的負担は低い

$$T_t = \beta(1 - \tilde{L})I_t S_t$$

感染者  $I_t$  を全員見つけて隔離 ( $\tilde{L} = 1$ ) できればパンデミックは即収束。

- ▶ 日本では数多くの批判がされた
  - ▶ 「非現実的．医療の限界を越えている」
  - ▶ 「経済学者が疫学に口出しするな」
- ▶ アメリカではかなりの程度実施されていた
  - ▶ OSU ではキャンパスに入構するためには週一の検査が義務だった

# 実験 3 : ロックダウンのタイミング

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

ロックダウンの役割

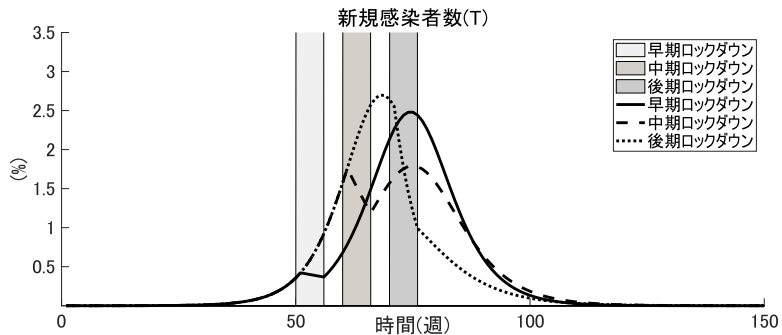
ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

## 異なるロックダウンの時期の比較



感染者が多いときに行った方が、大きな効果が見込める



# 実験3：ロックダウンのタイミング

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

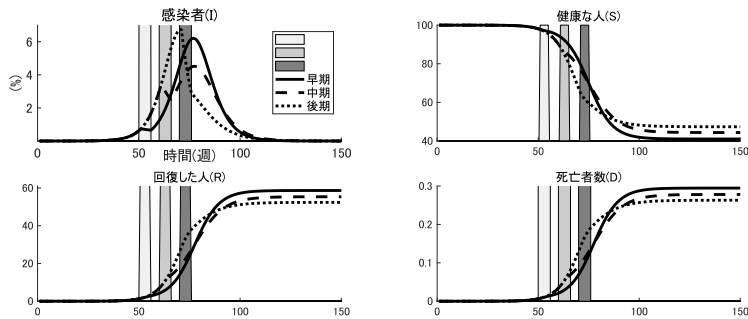
ロックダウンの役割

ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング



感染者が多いときに行った方が効果的

- ▶ ピーク時に抑え込むと効果は大きい
- ▶ この例だと、後期にロックダウンが効果的

(ただし、現実には死亡者を抑えるために、「早めに何度も」ということは出来ることに注意)

# 実験4：ロックダウンの長さ

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

SIRD モデル

仮想実験

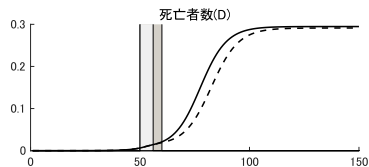
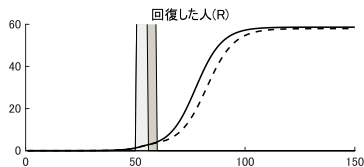
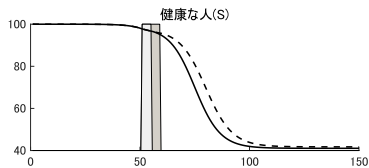
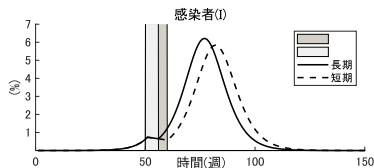
ロックダウンの役割

ロックダウンのタイミング

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング



- ▶ ロックダウン中と直後は，長い方が効果大
- ▶ ロックダウンから時間が経つと，その効果はほぼ消失していく

# 発展：SIRD モデルの拡張の余地

これまでの教えた SIRD モデルは次のような要素を見逃している.

- ▶ 回復  $\neq$  免疫獲得
  - ▶  $R$  が免疫保持は限らないかも...
  - ▶  $R \rightarrow S$  (※しかし、私の経験上、これは結果をあまり変えない)
- ▶  $I$  の分解：重傷者と無自覚症状者
- ▶ 医療の限界：
  - ▶ 特定の上限 (例. 病床数, ICU 数, 人工呼吸器数) を超えると死亡者が激増する

$$I_{t+1} = \begin{cases} I_t + T_t - \gamma_R I_t - (\gamma_D + \hat{\gamma}_D) I_t & \text{if } I_t > C \\ I_t + T_t - \gamma_R I_t - \gamma_D I_t & \text{if } I_t \leq C \end{cases}$$

$C$  は上限 (capacity).

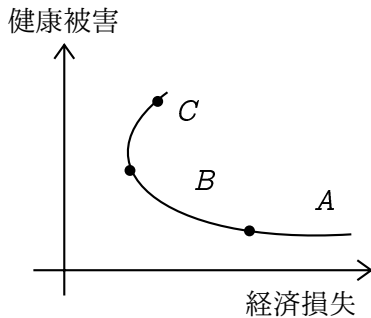
- ▶ ワクチン

拡張の可能性は色々あるし、すでに分析されている

# 疫学マクロ経済学

- ▶ 20 年 3 月中旬：初期の疫学マクロモデルの開発
  - ▶ 現在最も標準化したモデル：Eichenbaum, Rebelo and Trabandt ('20)
  - ▶ Alvarez, Argente Lippi ('20), Kaplan, Moll and Violante ('20), Glover, Heathcote, Krueger, Rios-Rull('20)
- ▶ 20 年 4/1：様々な webinar の開始 (vmacs, health,etc). 上記の研究が世界に配信される
- ▶ 20 年 4 月上旬：日本でも上記の研究の再現等が始まる

以下，様々な経緯を経て，現在では論文数は爆発的に増加...



## 読み方

- ▶ 右上は最悪：人命被害も経済損失も大きい
  - ▶ 例えば C 点是最悪．B の方がまだ良い
  - ▶ A 点と B 点は，倫理・政治・民主的判断が必要

# パンデミック可能性フロンティアのシフト

疫学マクロ

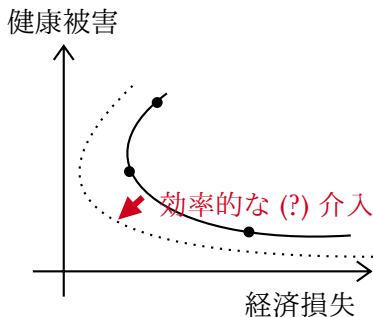
日野将志

純粋な疫学モデル

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング



効率的だと考えられて検討・提案された政策：“Targeting”

- ▶ 影響を受けやすい人を隔離：老人優先隔離
- ▶ 大量検査・大量隔離案：感染者隔離

- ▶ 純粋な疫学モデル：SIRD モデル
  - ▶ ソローモデルみたいなもの
    - ▶ 個人の経済行動は考慮されていない
- ▶ 疫学マクロモデル：SIR+マクロモデル
  - ▶ “気のゆるみ” の自然な導入が可能：  
感染が小康状態になると買い物へ  $\Rightarrow$  また感染拡大  $\Rightarrow$  経済自粛やロックダウン  
 $\Rightarrow \dots$



現在，東大の仲田・藤井先生らが，マクロ経済学者として政策を牽引

- ▶ 首相との直接面会：

<https://www.sankei.com/politics/news/210508/plt2105080010-n1.html>

- ▶ 彼らのメディア活動一覧：<https://covid19outputjapan.github.io/JP/media.html>

以降，仲田・藤井モデルの解説

## 仲田・藤井モデルの特徴

- ▶ SIRD+超簡単な経済モデル
- ▶ SIRD パートは原則前述のとおり

$$S_{t+1} = S_t - T_t(\cdot) - \underbrace{V_t}_{\text{vaccinated}}$$

$$I_{t+1} = I_t + T_t(\cdot) - \gamma_R I_t - \gamma_D I_t$$

$$R_{t+1} = R_t + \gamma_R I_t + V_t$$

$$D_{t+1} = D_t + \gamma_D I_t$$

- ▶  $T_t$  の関数形は後述
- ▶  $V_t$  : ワクチン接種による抗体獲得

$$Y_t = \underbrace{(1 - L_t)A_t(\{L_j\}_{j=0}^{t-1})}_{\text{一人当たり生産性}} \underbrace{(S_t + \alpha_I I_t + R_t)}_{\text{労働}}$$

- ▶  $1 - L_t$  : 緊急事態, social distancing によって棄損された生産性
- ▶  $A_t(\{\alpha_j\})$  : 過去の緊急事態宣言等によって持続的に棄損された生産性
- ▶  $\alpha_I$  : 感染者も一定程度働くことができる (例: 無症状・無自覚患者)

$$T_t = \frac{\hat{\beta}_t}{POP_0} I_t S_t$$

$$\text{where } \hat{\beta}_t = \beta_t(1 - hL_t)^2$$

- ▶  $POP_0 (= I_0 + S_0)$  : 初期人口
- ▶  $\hat{\beta}_t$  : 効率感染率
- ▶  $\beta_t$  : コロナの感染率
  - ▶ 例えばマスク着用率が上がると下がる. また例えば変異種は  $\beta$  が高い
- ▶  $(1 - hL_t)^2$  : 経済活動が下がることで, 感染率が下がる効果 ( $h$  はパラメータ)

# 主要結論 1 : 感染と経済のトレードオフ

疫学マクロ

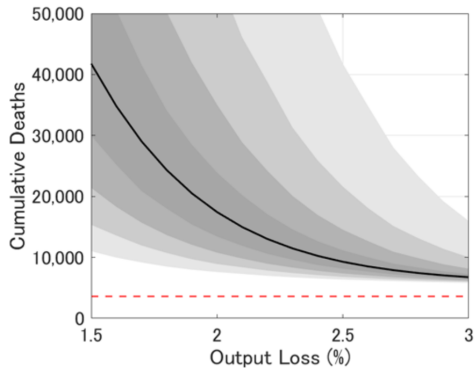
日野将志

純粋な疫学モデル

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング



## 主要結果

- ▶ 感染と経済にはトレードオフ
- ▶ 限界的な感染抑止効果が逡減
- ▶ 推定の誤差はとても大きい可能性

## 仲田・藤井のシミュレーションの設定

- ▶ 政府は1日の感染者数が2000人を超えると緊急事態を宣言
- ▶ 設定した経済損失のペースを維持
- ▶ ある基準 (新規感染者が週に  $500 \times 7$  人 or  $300 \times 7$  人) を下回ると解除する

これを必要であれば何度も繰り返すという想定

# 主要結論 2 : 感染と経済のトレードオフと緊急事態宣言

疫学マクロ

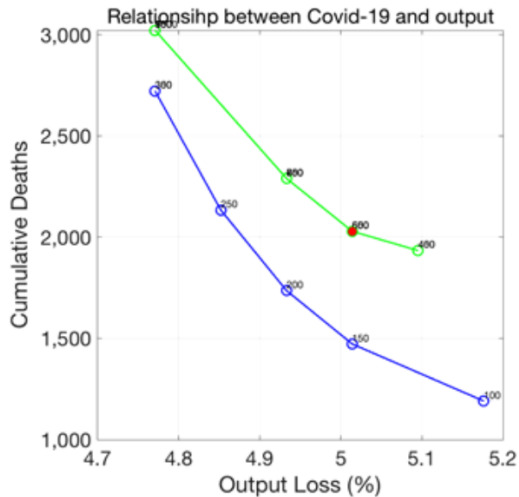
日野将志

純粋な疫学モデル

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング



## 主要結果

- ▶ 緑：  
2回短い緊急事態宣言
- ▶ 青：  
1回長い緊急事態宣言

⇒ 仲田・藤井グループは厳しい基準  
(300 人/日) の緊急事態宣言を提案



## ▶ 日本語オンラインで読めるもののみ

- ▶ 仲田・藤井 [link](#)，藤井 [link](#)，久保田 [link](#)，猪野・千葉 [link](#)，日本経済学会 [link](#)，経済セミナー [link](#)，[link](#)

## ▶ 他にも，経済セミナーという雑誌 [link](#)

## ▶ これらの中で紹介されている参考文献

補論：コーディング

MATLAB を例に

基本的には、数値計算やコーディングは電卓のようなもの  
注意事項

(1) = は等号ではない

= は「右辺で左辺を定義する」という意味. == が等号  
(※ R 等, = の代わりに < - 等を使う言語もある)

(2) ベクトルや行列は、配列と呼ぶ

(3) 最も特徴的な演算は (1)for ループ, (2)while ループ, (3)if 文

For ループは、 $T$  回ループを繰り返すという演算

▶ 数式例：

$$a = \sum_{t=1}^T a_t$$

▶ MATLAB コード例

```
1 % some codes
2 a=0;
3 for t=1:T
4     a = a + a_t(t);
5 end
```

While ループは、「ある条件を満たすまで」ループを繰り返すという演算

- ▶ ほぼ全ての場合、For ループで代替できる.

(私個人は、全て For ループで書くため、While ループを使わない)

If 文は条件付け. 「A が起きたら, B する」という命令

▶ 数式例:

$$a = \begin{cases} x + b & \text{if } x < 1 \\ x + c & \text{else} \end{cases}$$

▶ MATLAB コード例:

(※: コード例を挿入しようとしたら, 日本語のパッケージと色々干渉してしまった…)

## SIRD モデルのコード

一番基本のケース (緊急事態宣言なし)

## コード (1) : 準備パート

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

```
1 clc;clear all;close all; % cleaning up
2
3 % Parameter setting
4 T=150; % simulation length
5 beta = 0.5852; % infection rate
6 gamma_D = 7/18*0.005; %death probability
7 gamma_R = 7/18*(1-0.005) ; % recovery probability
8
9 % preparation of matrices
10 S=zeros(1,T);%population of susceptible at all t
11 I=zeros(1,T);%population of infectious at all t
12 R=zeros(1,T);% population of recovered at all t
13 D=zeros(1,T);% number of death at all t
```



## コード (2): Loop パート

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

```
1 % Initial Condition
2 I(1) = 10^(-6); % =1e-6
3 S(1) = 1 - I(1);
4 R(1) = 0;
5 D(1) = 0;
6
7 % Loop
8 for t=2:T
9     S(t) = S(t-1) - beta*S(t-1)*I(t-1);
10    I(t) = I(t-1) + beta*S(t-1)*I(t-1) - ...
        gamma_R*I(t-1)-gamma_D*I(t-1);
11    R(t) = R(t-1) + gamma_R*I(t-1);
12    D(t) = D(t-1) + gamma_D*I(t-1);
13 end
14 Trans=beta.*S.*I;
```

## コード (3): 図示パート

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

```
1 % Figure 1
2 figure
3 plot([1:T],Trans*100,'k','LineWidth',1.5)
4 title('新規感染者数(T)','FontSize',20)
5 xlabel('時間週()', 'FontSize',14,'interpreter','latex')
6
7 % Figure 2
8 figure
9 subplot(2,2,1)
10 plot([1:T],I*100,'k','LineWidth',1.5);
11 title('感染者(I)', 'FontSize',20,'interpreter','latex')
12 xlabel('時間週()', 'FontSize',14,'interpreter','latex')
13
14 subplot(2,2,2)
15 plot([1:T],S*100,'k','LineWidth',1.5);
16 hold on
17 title('健康な人(S)', 'FontSize',20,'interpreter','latex')
```

## コード (3): 図示パート (cont'd)

疫学マクロ

日野将志

純粋な疫学モデル

疫学マクロ経済学

仲田・藤井論文

補論：コーディング

```
1 subplot(2,2,3)
2 plot([1:T],R*100,'k','LineWidth',1.5);
3 hold on
4 title('回復した人(R)','FontSize',20,'interpreter','latex')
5
6 subplot(2,2,4)
7 plot([1:T],D*100,'k','LineWidth',1.5);
8 hold on
9 title('死亡者数(D)','FontSize',20,'interpreter','latex')
```