

人の移動を考慮した感染伝播モデルの COVID-19の国内初期流行への応用

斎藤 正也 （長崎県立大学シーボルト校情報セキュリティ学科）

共同研究者:

竹内昌平（長崎県立大）・山内 武紀（昭和大学）・内田 満夫（群馬大学）

∴ 本研究は統計数理研究所のコロナ対策プロジェクトの支援を受けています

自己紹介



- 略歴

- 2005年 総合研究大学院大学天文科学専攻修了
- 2005-8年 産総研システム検証研究センター
- 2008-20年 統計数理研究所データ同化センター('11～)
- 2020年- 長崎県立大学シーボルト校情報セキュリティセンター

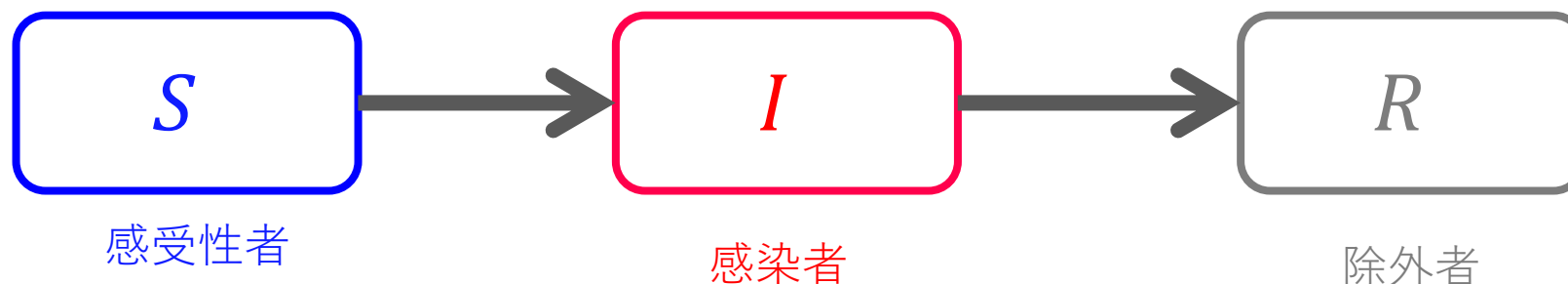
- 研究テーマ

- 天体力学/統計学・時系列解析/感染症数理モデル

モデルと手法

感染ダイナミクス (SIRモデル)

- 集団を、病気の進行に沿って
 - 感受性者 (まだ罹っていない人) S
 - 感染者 (他者への感染力を持つ) I
 - 除外者 (免疫を獲得し、伝染に寄与しない) R
- に分けて、その数量変化を考えよう。



新規感染者数 ($S \rightarrow I$)

感受性者

S

感染者

I

除外者

R

人との接触

- 雑踏
- 学校・会社
- 過程
- ...

感染者

化学反応にたとえる

t 日目から $t + \Delta t$ 日目に感染する人数 $\Delta(S \rightarrow I)$

=

ひとりが1日に会う感染者の数[†]

$$cI(t)/N$$

×

1回の接触における伝染確率

$$b$$

×

感染しうる人の人数

$$S(t)$$

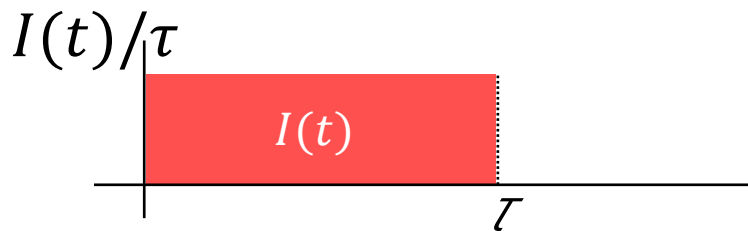
× Δt

$$\Delta(S \rightarrow I) = bcS(t)I(t)\Delta t/N$$

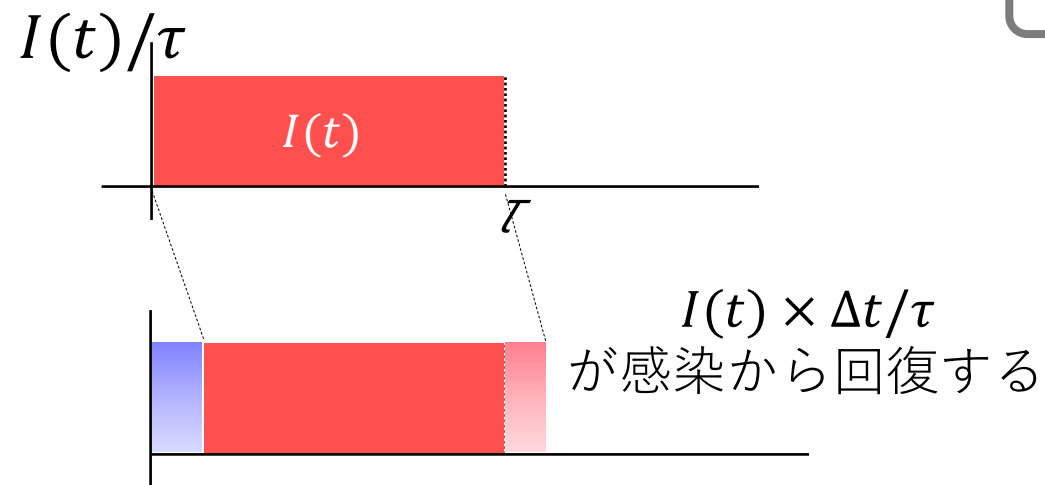
[†] 1日 c 人に会うとして、**集団の人口を N 人**とすると $cI(t)/N$

回復 ($I \rightarrow R$)

全員が同じ感染期間 τ を持つときの
感染年齢分布
(感染からの経過時間の集団内の分布)



この年齢分布が維持されるとすると …



感受性者

S

感染者

I

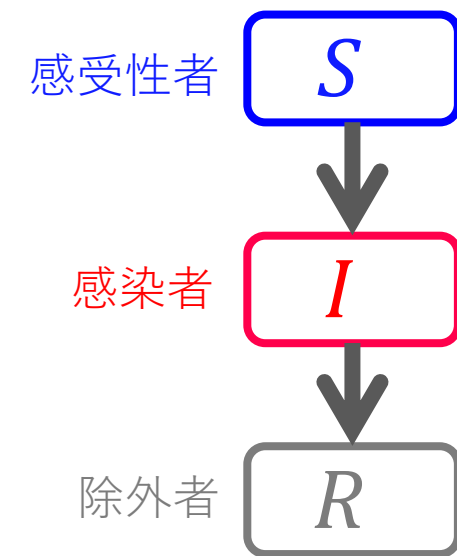
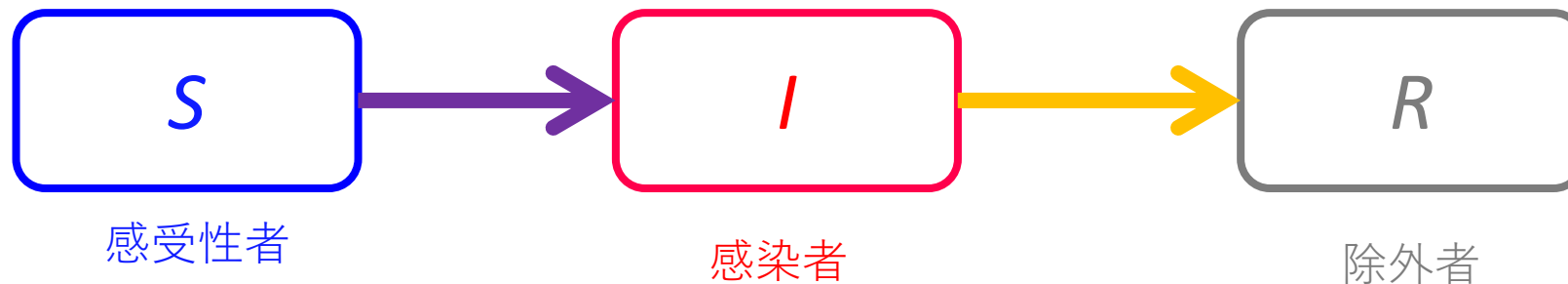
除外者

R

t 日目から $t + \Delta t$ 日目に回復する感染者数
$$\Delta(I \rightarrow R) = I(t)\Delta t / \tau$$

まとめると

- $\Delta(S \rightarrow I) = bcS(t)I(t)\Delta t/N$
- $\Delta(I \rightarrow R) = I(t)\Delta t/\tau$
- $S(t + \Delta t) = S(t) - \Delta(S \rightarrow I)$
- $I(t + \Delta t) = I(t) + \Delta(S \rightarrow I) - \Delta(I \rightarrow R)$
- $R(t + \Delta t) = R(t) + \Delta(I \rightarrow R)$



SIRモデル

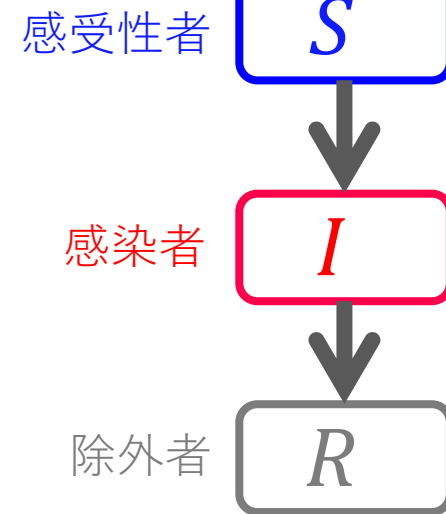
決定論的 (微分方程式)

- 連続化

$$\frac{dS}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{S(t + \Delta t) - S(t)}{\Delta t} = -bcSI/N \quad \text{等々}$$

- $\frac{dS}{dt} = -bcSI/N$
- $\frac{dI}{dt} = bcSI/N - I/\tau$
- $\frac{dR}{dt} = I/\tau$

確率論的 (確率過程)



- 病態が変化した人数を二項分布などでモデリング

- 以下の前ページの漸化式に追加:

- $\Delta(S \rightarrow I) \sim \text{Binom}(S, 1 - e^{-bcI\Delta t/N})$
- $\Delta(I \rightarrow R) \sim \text{Binom}(I, 1 - e^{-\Delta t/\tau})$

- 注: $\Delta t \rightarrow 0$ で $1 - e^{-X\Delta t} \rightarrow X\Delta t$

メタポピュレーションモデル: 人の移動を考慮した感染の記述

パラメータ

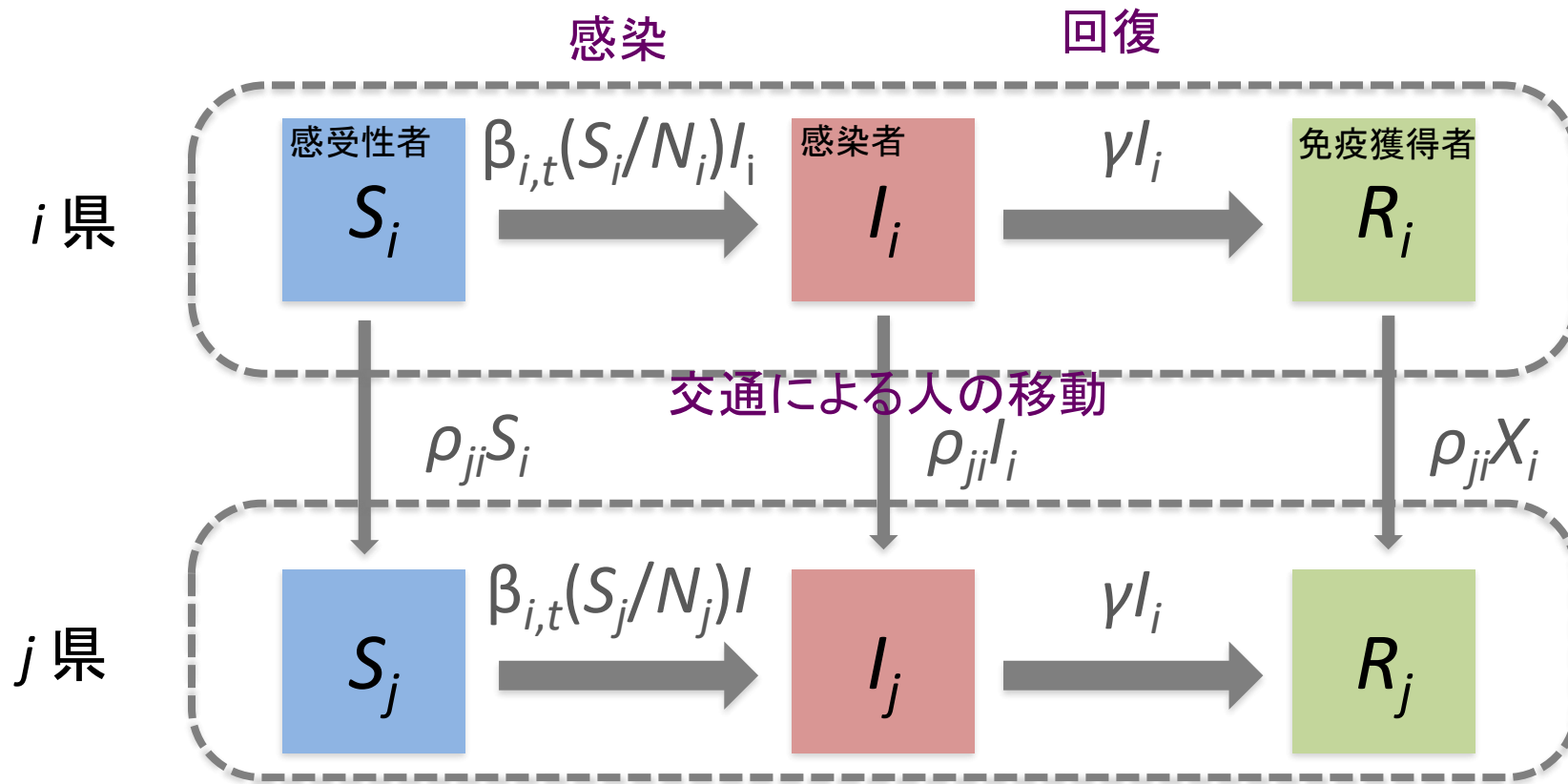
$\beta_{i,t}$: うつりやすさ

$T_{\text{inf}} = \frac{1}{\gamma}$: 感染期間

実効再生産数

$$\mathbf{R}_{i,t} := \beta_{i,t} / T_{\text{inf}}$$

『1人の感染者によって生み出される二次感染者数 (の期待値)』

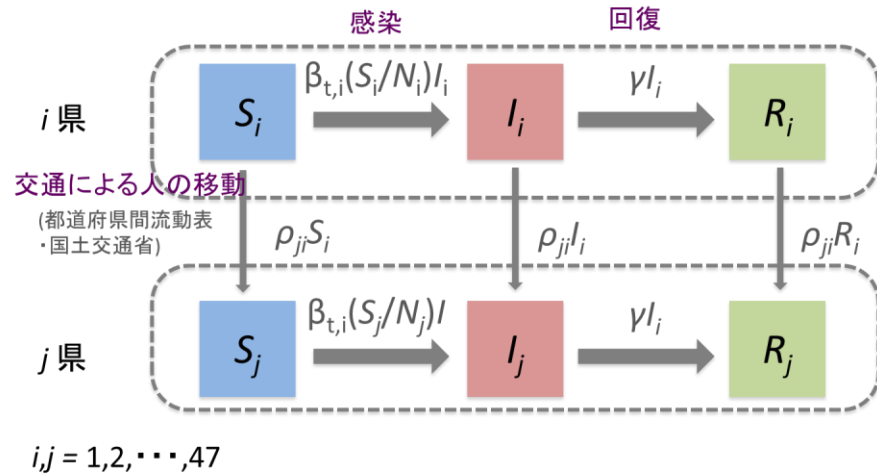


場所 (都道府県) $i, j = 1, 2, \dots, 47$, t : 時刻 (日付)

※の“R”と区別して太字立体で書きます

メタポピュレーションモデル: 人の移動を考慮した感染の記述

システムモデル



新規感染者発生や人流は二項分布に従うと仮定

$$S_{i,t} = S_{i,t-1} - \Delta(S_{i,t} \rightarrow I_{i,t}) - \sum_{j \neq i} \Delta(S_{i,t} \rightarrow S_{j,t}) + \sum_{j \neq i} \Delta(S_{j,t} \rightarrow S_{i,t})$$

$$I_{i,t} = I_{i,t-1} + \Delta(S_{i,t} \rightarrow I_{i,t}) - \Delta(I_{i,t} \rightarrow R_{i,t}) - \sum_{j \neq i} \Delta(I_{i,t} \rightarrow I_{j,t}) + \sum_{j \neq i} \Delta(I_{j,t} \rightarrow I_{i,t})$$

$$R_{i,t} = R_{i,t-1} - \Delta(I_{i,t} \rightarrow R_{i,t}) - \sum_{j \neq i} \Delta(R_{i,t} \rightarrow R_{j,t}) + \sum_{j \neq i} \Delta(R_{j,t} \rightarrow R_{i,t})$$

感染:

$$\Delta(S_{i,t} \rightarrow I_{i,t}) \sim \text{Binom}(S_{i,t}, 1 - \exp(-\beta I_{i,t} \Delta t / N_{i,t}))$$

$$\Delta(I_{i,t} \rightarrow R_{i,t}) \sim \text{Binom}(I_{i,t}, 1 - \exp(-\gamma \Delta t))$$

移動:

$$\Delta(X_{i,t} \rightarrow X_{j,t}) \sim \text{Binom}(X_{i,t}, 1 - \exp(-\rho_{ij} \Delta t)) \quad \text{for } X \in \{S, I, R\}$$

観察モデル

モデル予測を期待値とするポアソンを仮定

$$J_{i,t} \sim \text{Pois}(\lambda = \Delta[S \rightarrow I]_{i,t})$$

データの学習など

- 粒子フィルタによるデータ同化
(サンプル数 $n_{\text{par}} = 262,080$)
- 全国一律に $R_0 = 1.85$, $T = 4$ 日を仮定.

モデルのくわしくは近日発刊の船渡川先生の「統計数理」
特集「公衆衛生－新型コロナウイルス感染症」を参照.

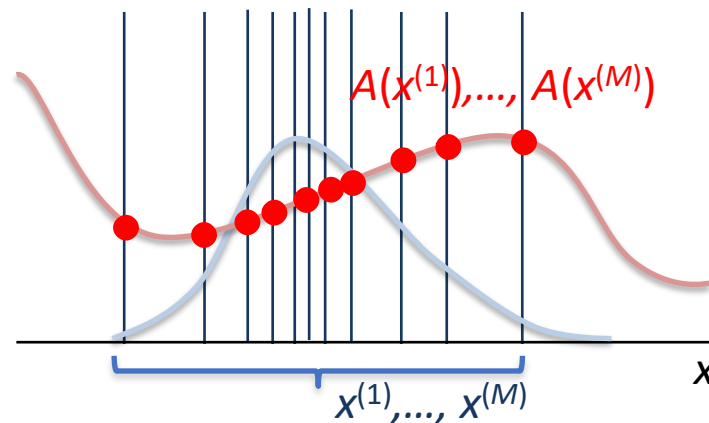
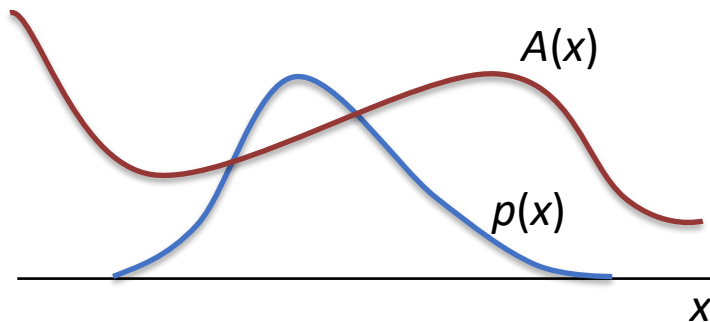
参照した流動表 <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000027669878&fileKind=0>

モンテカルロ近似

- 確率変数 $x \sim p(x)$ の M 個の実現値 $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(M)}$ を得ているとする.
 - * $p(x)$ に従う乱数なんらかのアルゴリズムで生成できる状況を考える.
- このとき M が十分大きければ以下の近似式がなりたつ†

$$\int A(x)p(x)dx \gg \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M A(x^{(i)})$$

“ x に依存した量 $A(x)$ の期待値はその標本平均で近似できる”



粒子フィルタ

- 変数たちを

- シミュレーションの変数@時刻 t $X_t = (S_{i,t}, I_{i,t}, \mathbf{R}_{i,t})_{i=1}^{47}$

- データ@時刻 t $Y_t = (J_{i,t})_{i=1}^{47}$ (各都道府県の新規感染者数)

とまとめたとき, 条件付き確率のモンテカルロ近似

$$p(X_t | Y_1, \dots, Y_t) \approx \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \delta(X_t - X_t^{(i)})$$

を $t = 1, 2, \dots$ について逐次的に求める手法

- 基本的に計算量は多大 (サンプル数 M が大きい)

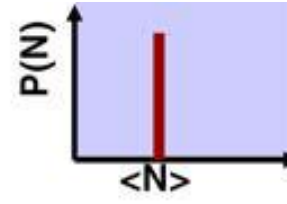
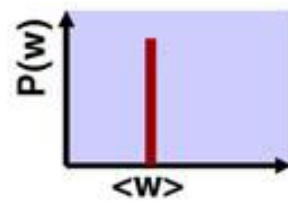
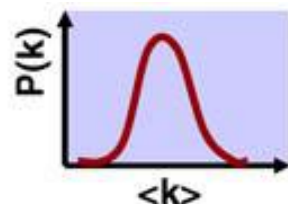
モデルの背景: 結合次数分布の重要性

流行の地域集中度

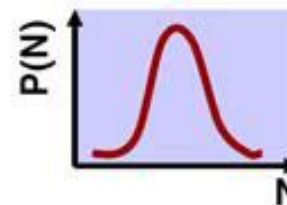
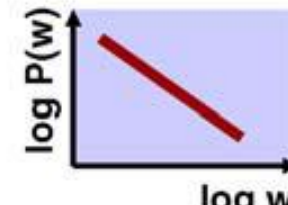
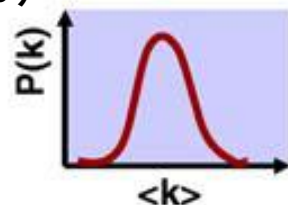
$$H(t) = -\frac{1}{\log V} \sum_j i_j(t) \log i_j(t)$$

V : 地域(ノード)数,
 $i_j = I_i / \sum_i I_i$: 感染者数

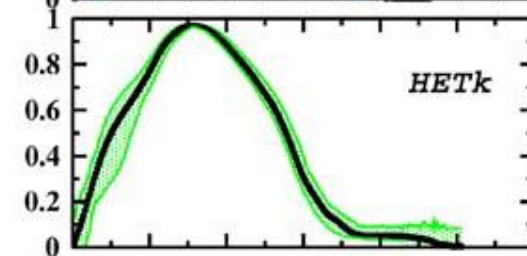
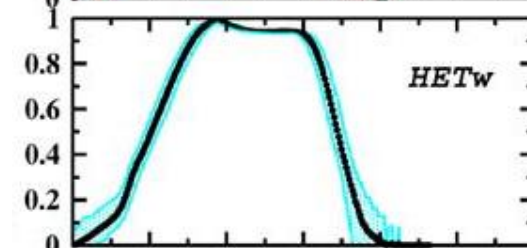
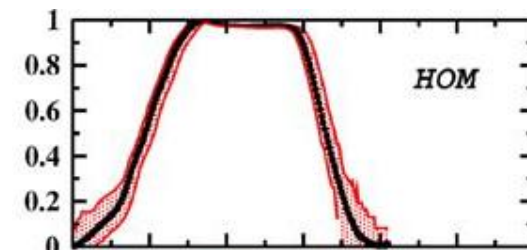
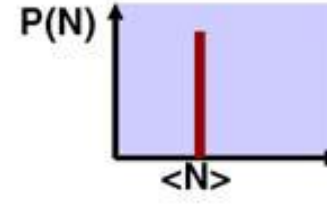
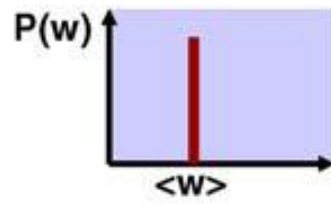
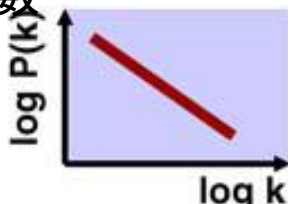
一様
HOM



べき乗重み
HETw



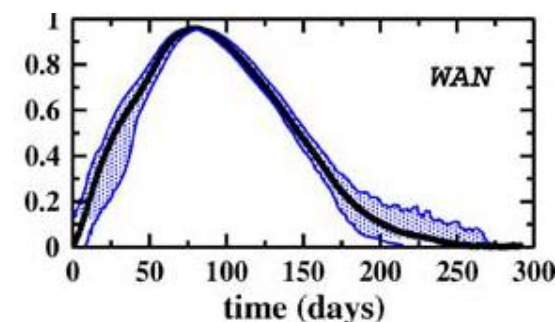
べき乗次数
HETk



モデル

V.S.世界航空ネットワーク

#V = 3840, エッジ数 = 18,810



実データ
 (インフルエンザ)

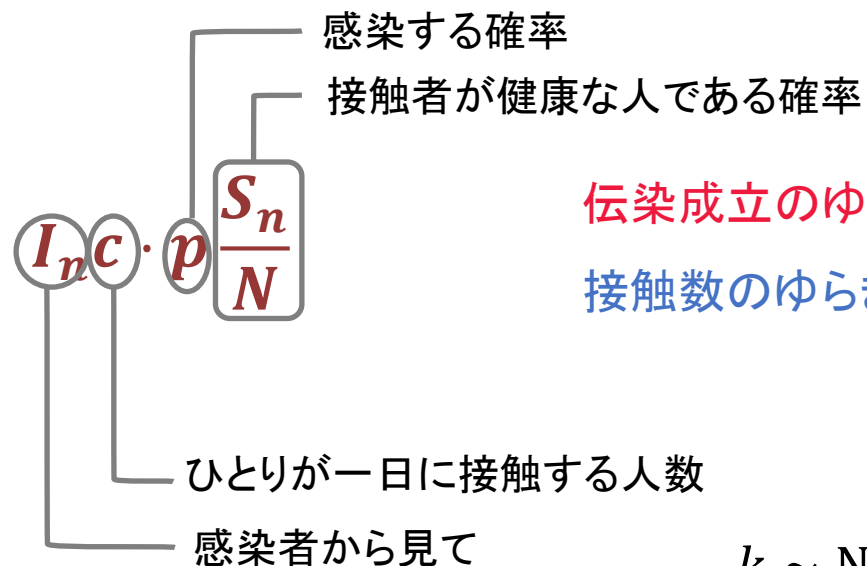
リッチな計算環境があれば
正攻法の計算を試したい!

県別 R_t の事前推定

- 地域別に R_t を設定する必要がある一方、データには同時推定するだけの識別力はないと考えられる(また、識別力がある場合でもモンテカルロ粒子数の限界のために推定は困難である)
- 短期間の1桁報告しかない地方が多いので、単一県だけで負の二項分布を使った個別推定を検討.

負の二項分布による
新規感染者数のモデル化

新しい感染者の数 $k =$



伝染成立のゆらぎ
接触数のゆらぎ

$$k|cI_n \sim \text{Pois}(p \cdot cI_n)$$
$$cI_n \sim \text{Gam}(I_n c_0, I_n \tilde{\sigma}_0^2)$$



積分消去

$$k \sim \text{NegBin}(I_n c_0 p, I_n c_0 p + I_n \tilde{\sigma}_0^2 p^2)$$

県別 $\mathbf{R}_t$ の事前推定

†一定期間の分散がステップサイズに依存しないように σ_0^2 をリパラメトライズ

- $J_t \sim \text{NegBin} \left(\mu = \frac{I_t \mathbf{R}_t \Delta t}{T_{\text{inf}}}, \sigma^2 = \mu + \frac{I_t \sigma_0^2 \Delta t}{T_{\text{inf}}} \right)$
 - 観測データ: 新規感染数 J_t , 潜在変数: 感染者数 I_t
 - パラメータ: 実効再生産数 $\mathbf{R}_t$, 過分散パラメータ: σ_0^2 , $T_{\text{inf}} = 4$ 日
- $I_t = J_{t-1} + J_{t-2} + \cdots + J_{t-T_{\text{inf}}} (=:\sum J_{t-1:t-T_{\text{inf}}})$
- **クラスタ** または区間の定義
 - T_{inf} 日連続で0件をクラスタ終了/開始のマークとする†.
 - n 日以上続く場合は分割する ($n=4,8,12$ 日).

†はしか・風しんの流行規模のべき乗則をデータから見出した研究を参考にした

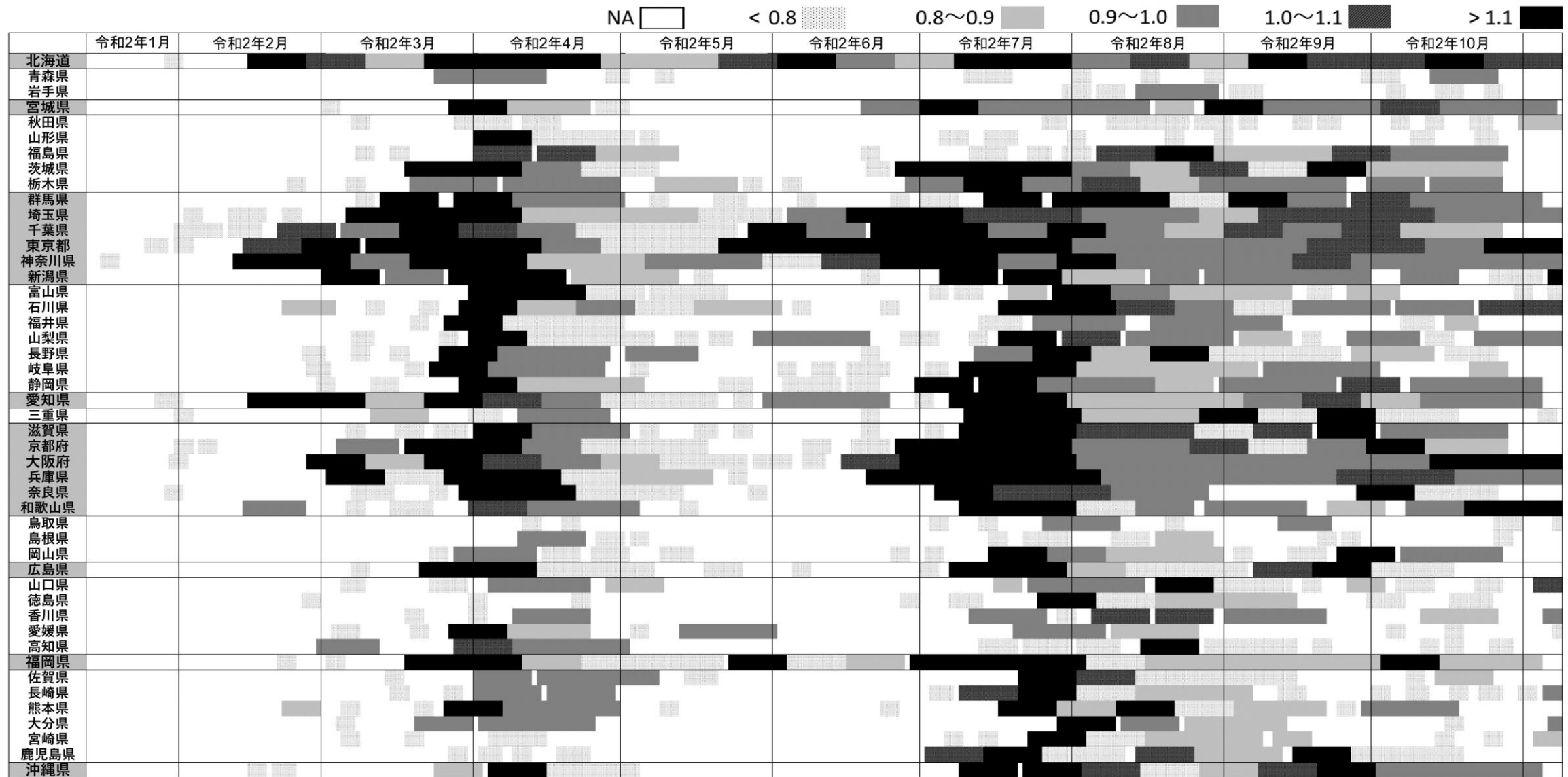
Yoshikura & Takeuchi, JJID 69, 293-299 Colizza+, Bulletin of Mathematical Biology 68, 1893-1921 (2006)

2020年の初期の動態

要旨

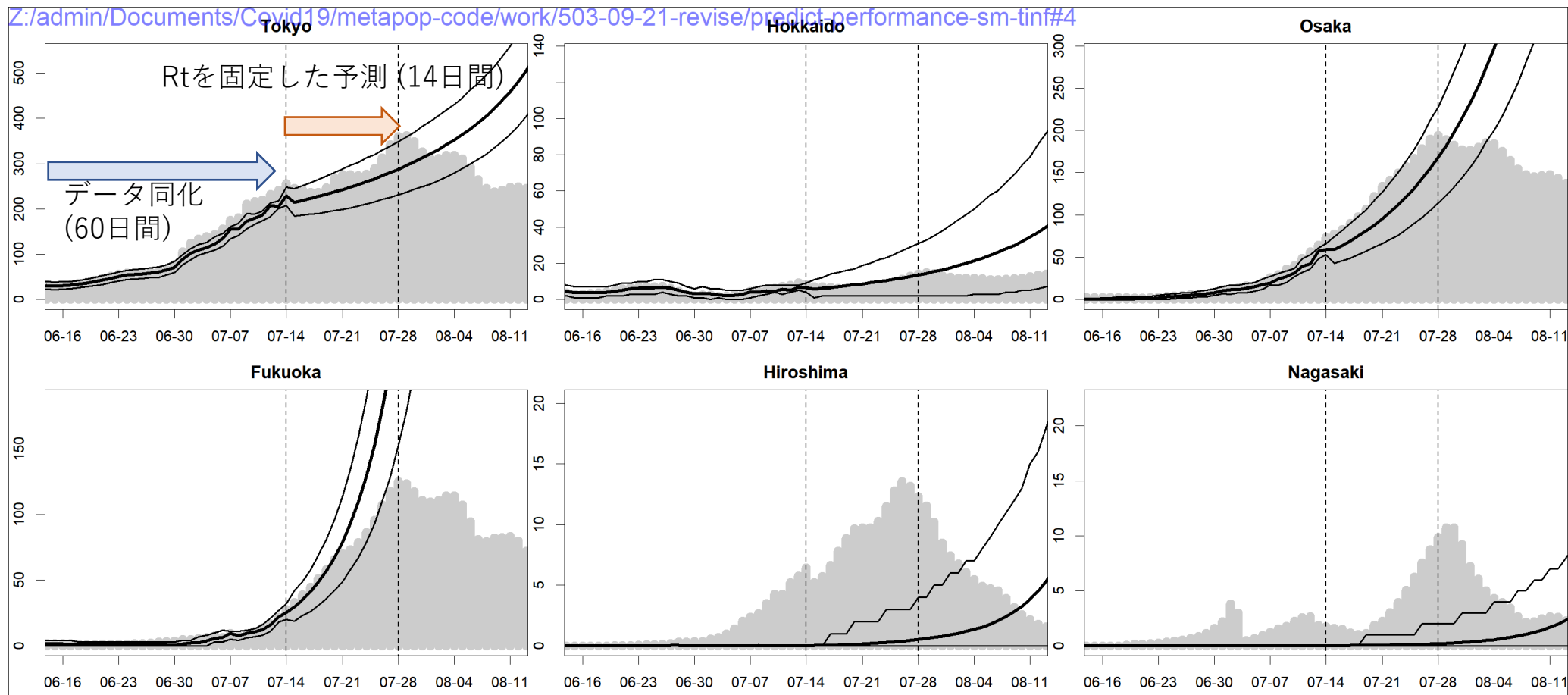
- (2020年においては) Covid-19は大都市で流行が維持されている。大都市からの感染者の導入により地方で小規模流行が散発的に発生していた。
- 人の地域間移動が力学的過程として入ったSIR型モデルを使った流行の再構成と将来予測，特に地方への流入リスク分析への適用可能性を調べる。
 - すでにデルタ株等の流行で多くの県で流行が持続しており，流入と捉えられる状況ではないが，**今後のためのツール構成**を目的に研究を継続している。
- データ同化による流行の再構成
 - 地域別の実効再生産数を事前に簡易推定
 - 同化結果
- 流入リスク評価の例
 - 長崎県で t 日までに s 人以上の流行が起こる確率を算出
- 手続きの問題点の考察

各都道府県の実効再生産数の推定結果



データの学習と予測

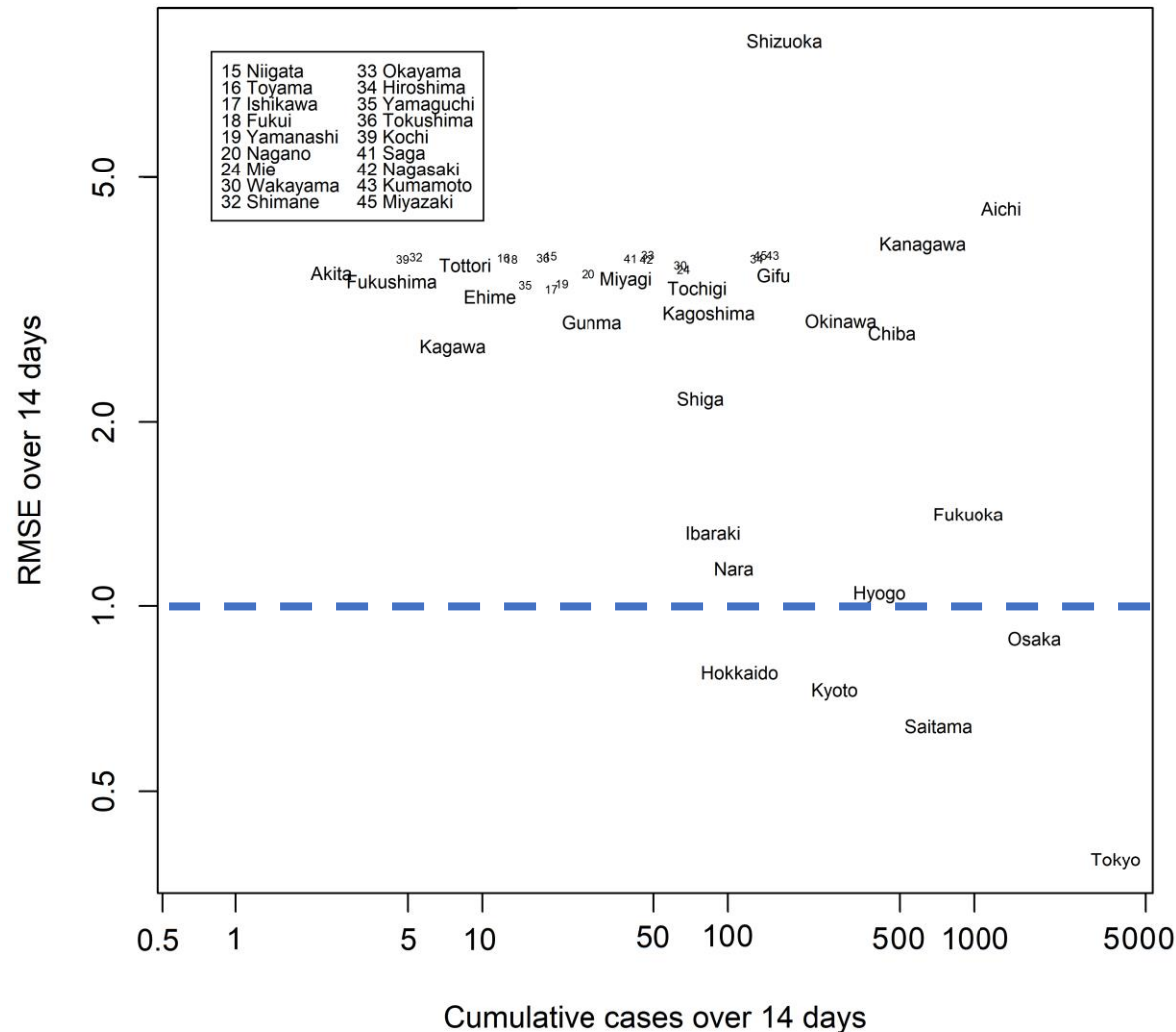
データ同化により60日間のデータを学習，その後14日予測



※感染性期間 $T_{\text{inf}} = 4$ 日を仮定

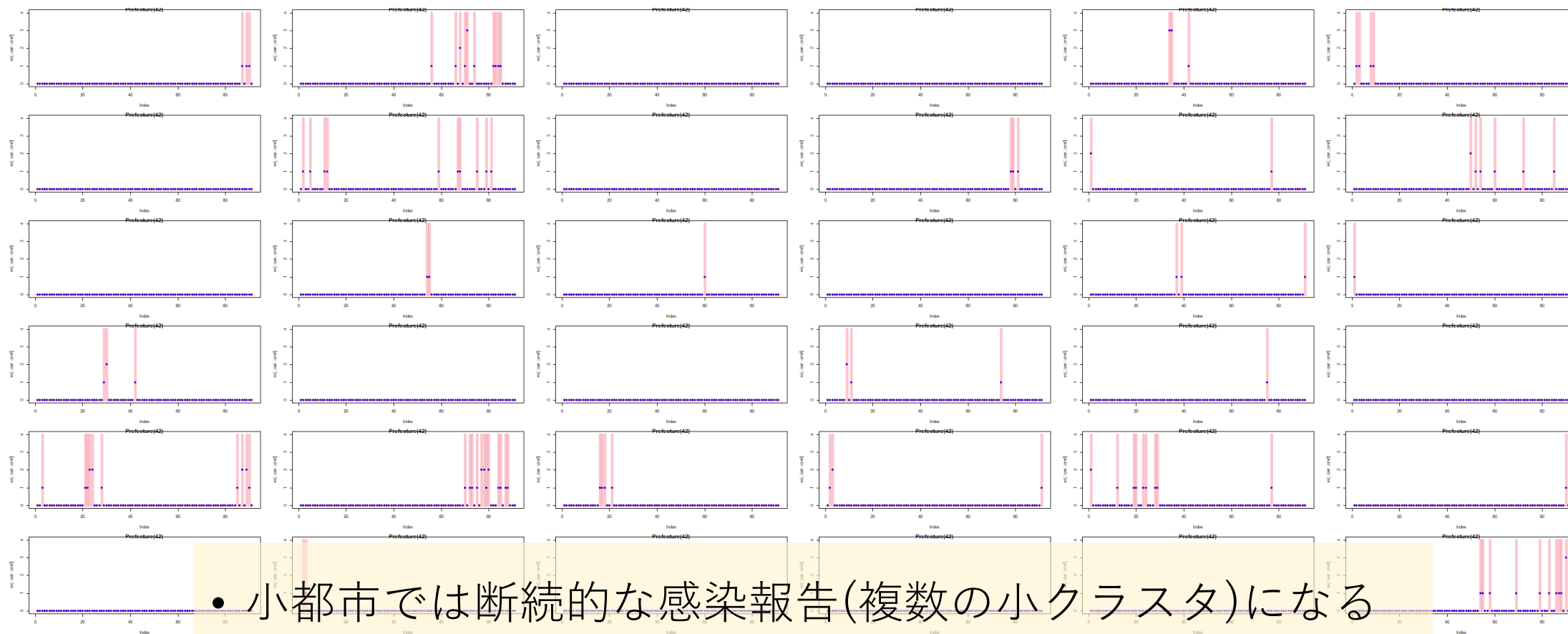
予測性能評価: 流行規模と誤差

横軸: 14日間の累積感染者数
縦軸: 14日間の平均平方二乗誤差



- 100%未満に抑えられるのは大都市に限られる.

構成モデルによる予測例: (42)長崎県, 36シナリオ

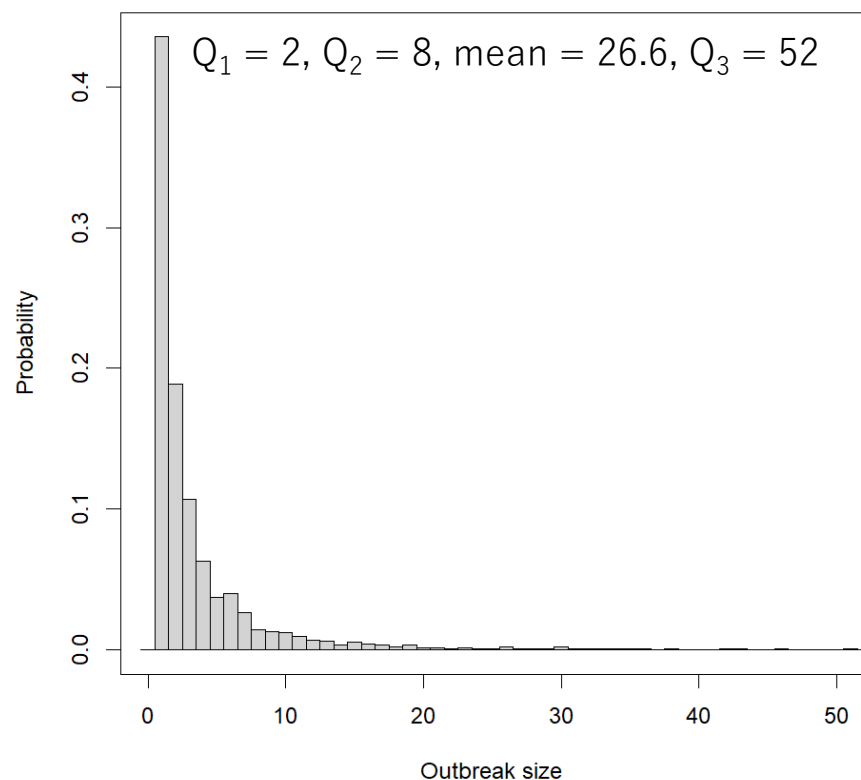


- 小都市では断続的な感染報告(複数の小クラスター)になる
- 報告数の平均・分散はよい要約にならない

経過時間ごとの流行規模リスク（例:長崎県）

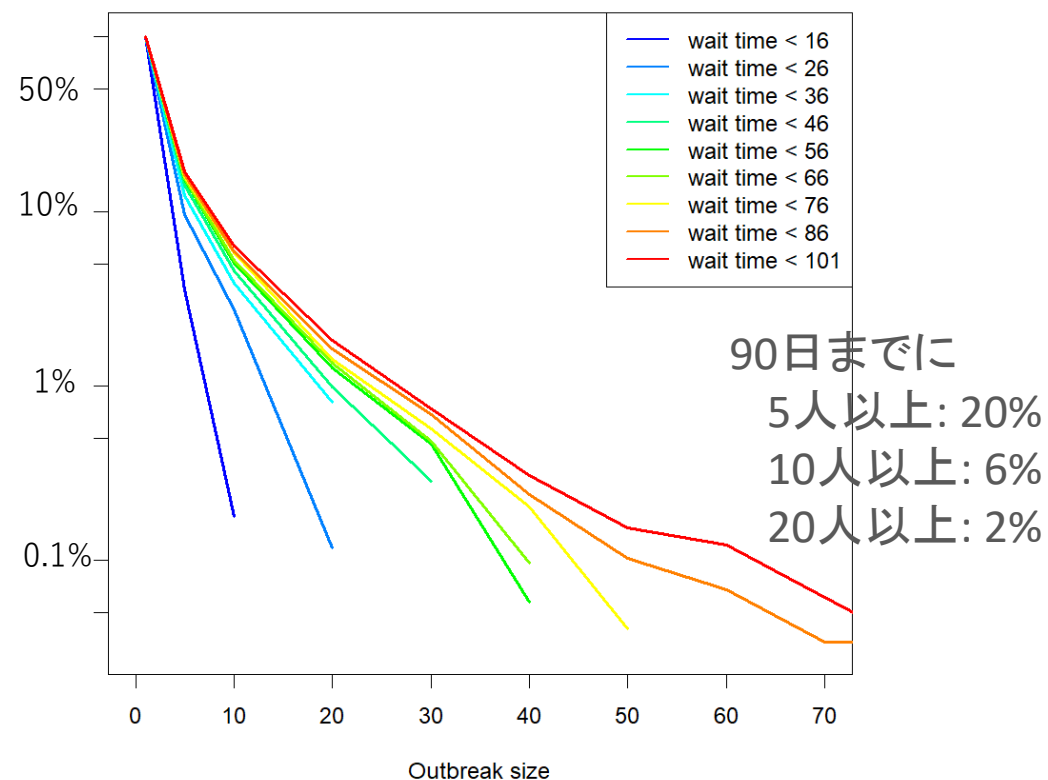
最終データから90日間予測

流行規模の頻度分布



経過時間別の流行規模の発生頻度

「 t 日までに s 人以上の流行が起こる確率」



オミクロン株の国内流入

オミクロン変異株の国内確認・発生

- オミクロン株: スパイクタンパク質に30か所程度のアミノ酸置換. 5か所程度の変異は受容体結合部位に存在.
- 2021年
 - 11月24日 南アフリカからWHOへ最初のオミクロン株感染者が報告
 - 12月17日 沖縄米軍基地で初の国内感染確認
 - 12月22日 渡航歴のない国内感染例確認
- 国立感染症研究所「SARS-CoV-2の変異株B.1.1.529系統（オミクロン株）について（第7報）」より
- <https://www.niid.go.jp/niid/ja/2019-ncov/2551-cepr/10945-sars-cov-2-b-1-1-529-7.html>

オミクロン変異株の国内拡大の様子

引き続き、厚生労働省ウェブページの報道関係資料より

- 2021年
 - 12月22日 渡航歴のない感染者2名が沖縄県(米軍基地)で確認.
 - 12月25日 「オミクロン株の国内発生状況」という資料がこの日以降毎日発表されるようになり、発見県別の人数が報告される.
 - 「京都府で4件、福岡県で1件」
 - 12月26日 「大阪府で2件、広島県で1件」
- 2022年1月13日「東京都で**186**件、沖縄県で**45**件、大阪府で**44**件、群馬県で**35**件、岡山県で**20**件、埼玉県で**17**件、北海道で**11**件、佐賀県で**11**件、福井県で**10**件、山梨県で8件、秋田県で2件、神奈川県で2件、静岡県で2件」
 - すべての県で渡航歴のない感染者が確認され、この日をもって都道府県別のオミクロン株感染報告は終了

⇒ データ化して状況を確認する

都道府県別報告（都道府県番号順）

Date	Hok	Aom	Iwai	Miy	Akit	Yam	Fuk	Ibar	Toc	Gun	Sait	Chit	Tok	Kan	Niig	Toy	Ishii	Fuk	Yam	Nag	Gifu	Shiz	Aichi	Mie	Shiga	Kyo	Osa	Hyo	Nar	Wak	Tott	Shir	Oka	Hiro	Yam	Tok	Kag	Ehir	Koc	Fuk	Sag	Nag	Kun	Oita	Miy	Kag	Okina			
NA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2021-12-22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
2021-12-23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
2021-12-24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2021-12-25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2021-12-26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2021-12-27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	0	1	4	7	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2021-12-29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2021-12-30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	9	3	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-31	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	9	15	3	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-01-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45
2022-01-02	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	13	6	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-01-03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	11	1	0	0	0	0	0	0	3	0	4	1	0	15	0	0	0	0	0	1	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24
2022-01-04	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	3	0	8	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	11	56	0	4	0	0	0	0	9	32	0	0	0	0	6	0	2	0	0	0	0	0	0	0	47	
2022-01-05	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	16	0	0	0	1	0	1	0	0	1	2	0	10	2	6	0	0	0	15	5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5	0	
2022-01-06	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	6	17	3	0	0	2	0	0	8	0	1	3	1	0	16	18	1	0	0	3	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	
2022-01-07	11	0	0	3	0	15	2	4	0	1	15	20	25	1	1	0	9	4	8	0	0	5	0	0	2	0	0	14	0	3	0	0	10	53	30	0	0	6	0	7	0	0	3	3	4	0	0			
2022-01-08	3	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	1	0	0	0	0	0	8	3	0	0	0	0	0	0	11	0	0	21	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3		
2022-01-09	2	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	26	0	0	7	27	0	0	7	0	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2022-01-10	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	30	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0		
2022-01-11	31	0	0	0	0	0	16	18	8	0	0	19	23	12	0	0	7	0	0	0	0	17	0	6	0	12	154	49	0	0	0	13	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2022-01-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	22	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	8	10	0	0	47		
2022-01-13	11	0	0	0	2	0	0	0	0	35	17	0	0	2	0	0	0	10	8	0	0	2	0	0	0	186	44	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	45	

都道府県別報告（第一感染者出現順）

沖縄

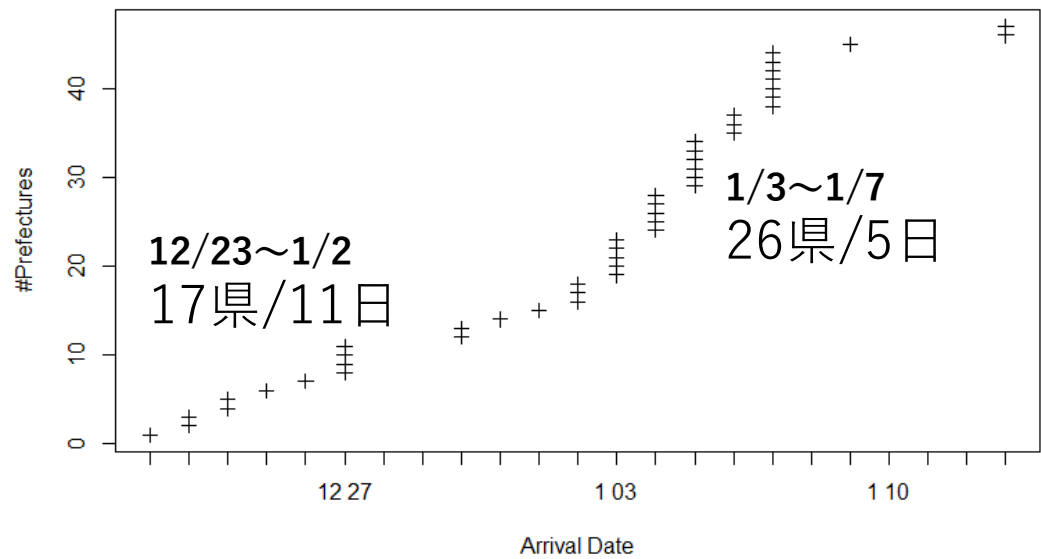
Date	Okir	Kyo	Osa	Tok	Yan	Fuk	Hiro	Toy	Shiz	Aic	Shig	Hyo	Shir	Yan	Chil	Ibar	Kag	Koc	Sait	Kan	Gifu	Mie	Oka	Hok	Iwat	Gun	Nar	Nag	Toc	Ishil	Yan	Tok	Oita	Kag	Miy	Nag	Tott	Fuk	Niig	Fuk	Wak	Ehir	Kun	Miy	Aom	Akit	Saga		
NA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-23	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-24	0	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-25	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-26	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-27	0	4	7	0	2	0	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-28	1	4	4	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-29	1	0	11	0	2	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-30	0	2	9	2	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021-12-31	0	9	15	0	7	0	0	0	0	1	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-01-01	45	0	4	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-01-02	0	13	6	0	0	0	0	0	0	13	0	0	14	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-01-03	24	0	15	11	0	0	12	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-01-04	47	11	56	8	32	6	9	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	1	1	1	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022-01-05	0	10	2	16	0	0	0	0	1	2	0	6	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2022-01-06	0	16	18	17	24	0	0	0	1	3	0	1	0	0	6	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	8	0	2	0	0	0	0	1	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2022-01-07	0	0	0	25	30	7	53	0	5	0	2	14	0	15	20	4	0	0	15	1	0	0	10	11	0	1	0	0	9	8	0	3	0	3	0	0	2	1	4	3	6	3	4	0	0	0	0	0	
2022-01-08	3	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	21	0	0	0	0	1	0	17	8	0	0	3	4	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2022-01-09	0	14	0	0	27	41	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	26	0	0	0	7	0	0	2	0	0			
2022-01-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	1	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	7	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0		
2022-01-11	0	12	154	23	56	0	0	0	17	0	0	49	0	0	19	18	0	0	0	12	0	6	13	31	0	0	0	0	8	7	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2022-01-12	47	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	10	0	0	0	0	22	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0		
2022-01-13	45	186	44	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	2	0	0	20	11	0	35	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	2	11			

観察される特徴

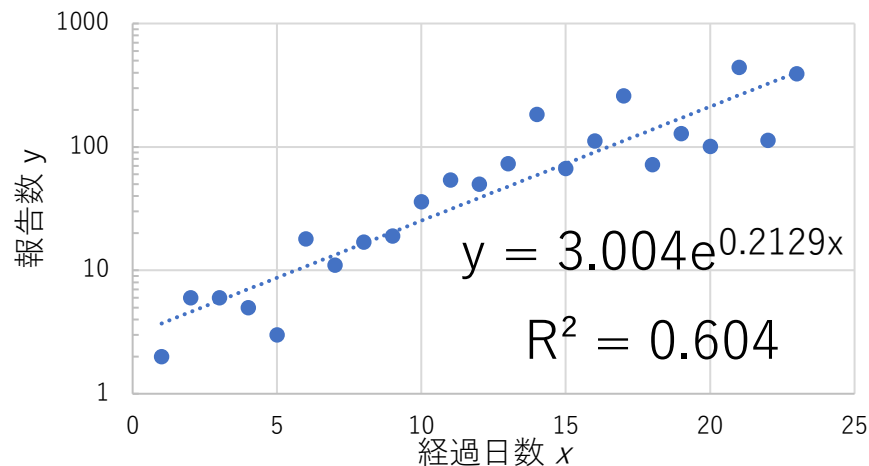
- 関西での報告が著しく，ただちに自発的な再生産過程が成立
- 1日に3～5県のペースで，拡散していった．ただし，1月3日以降，拡散のペースが鈍化している（⇒次ページ図）
- 2-5日隔てて，同一県で再度報告される．**仮に**，県内での再生産によるものと考えると，発症間隔の荒い見積もりが得られる．
- 23日間で393件の海外渡航のない感染者の報告

図による要約

拡散のペース



全国でのオミクロン株新規感染者

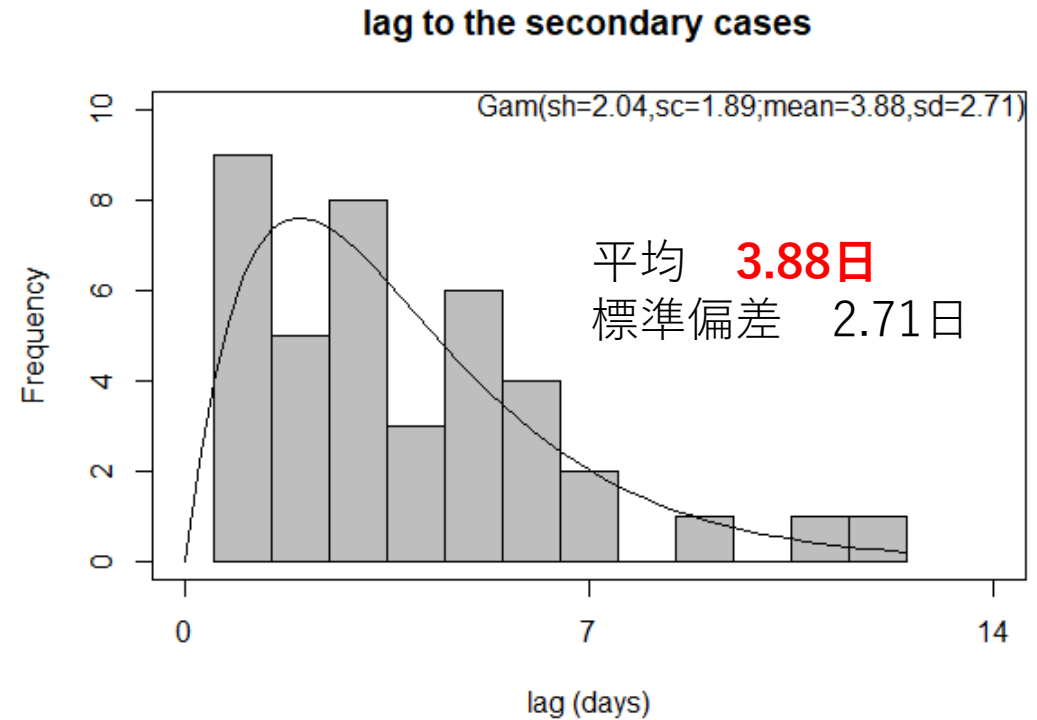


再生産数

$$R_0 = MT + 1$$

M	0.2129
T	R_0
2	1.43
3	1.64
4	1.85

同一県での再報告までの期間
(発症間隔の代理)

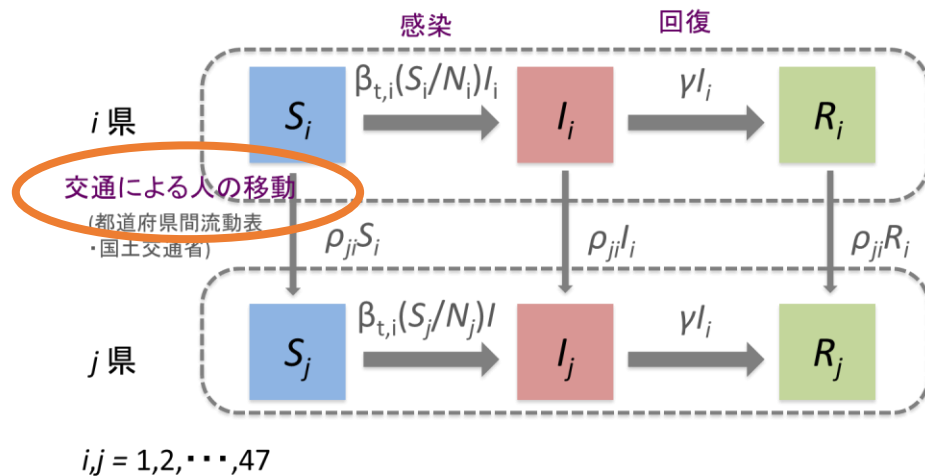


Cf. 感染ペア($n = 30$) による発症間隔

- 平均 **2.6日** (95%CI: 2.2-3.1),
- 発症間隔の95%を占める区間: 0.7-4.9日
- オミクロン株の発症間隔の暫定報告, 国立感染症研究所 (1月31日)
<https://www.mhlw.go.jp/content/000892313.pdf>

過大ではあるが従前株よりサイクルの短縮は見られる?

同化による感染者の移動量の可視化



- シミュレータの上には「どこから」へ「どこへ」感染者が移動したかの確率が存在する
- 粒子フィルタによって実報告数による条件付き分布が得られる

```
F = array(dim=c(nSite,nSite),0) # nSite = 47
C = array(dim=c(nSite,nSite),0)
for (i in 1:nrow(xs)) { # forall particles
  nedge = xs[i,1]
  for (j in seq(2,by=3,length.out=nedge)) {
    from = xs[i,j]
    to   = xs[i,j+1]
    cnt  = xs[i,j+2]
    F[from,to] = F[from,to] + 1
    C[from,to] = C[from,to] + cnt
  }
}
```

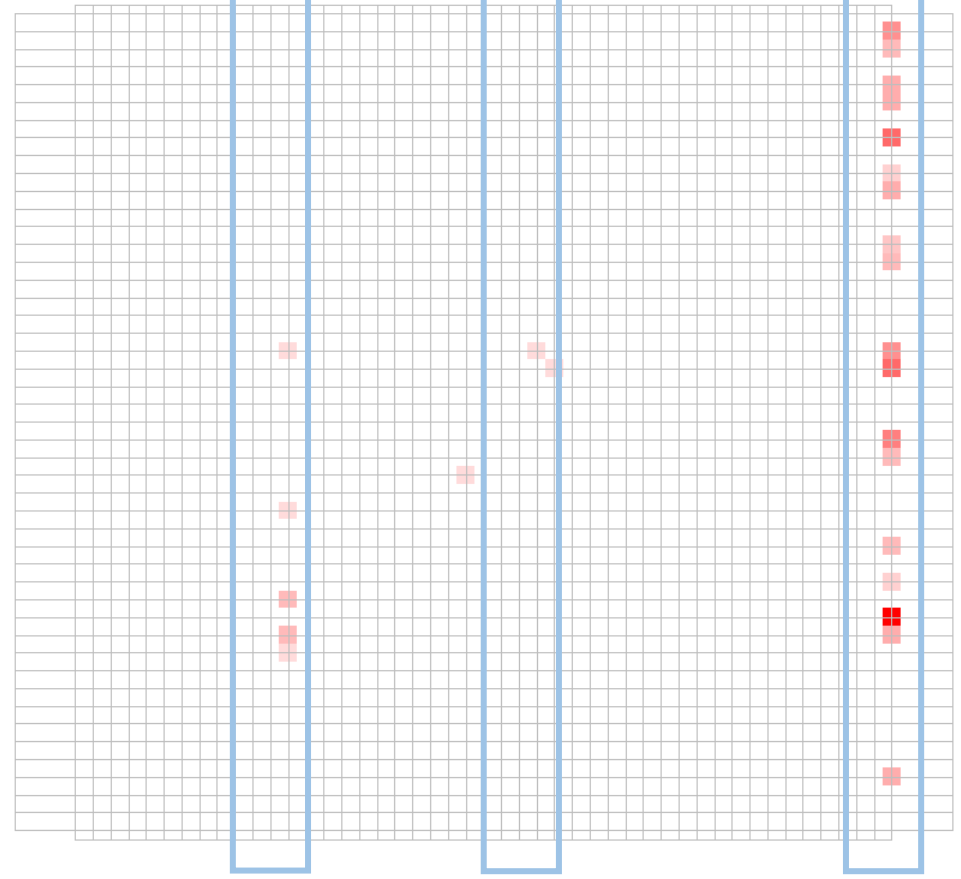
と定義される行列FとCで移動量のフィルタ分布を表示
 行列F: エッジの存在だけを見る
 行列C: さらに移動人数も見る

感染者の流入

from

$\log F$

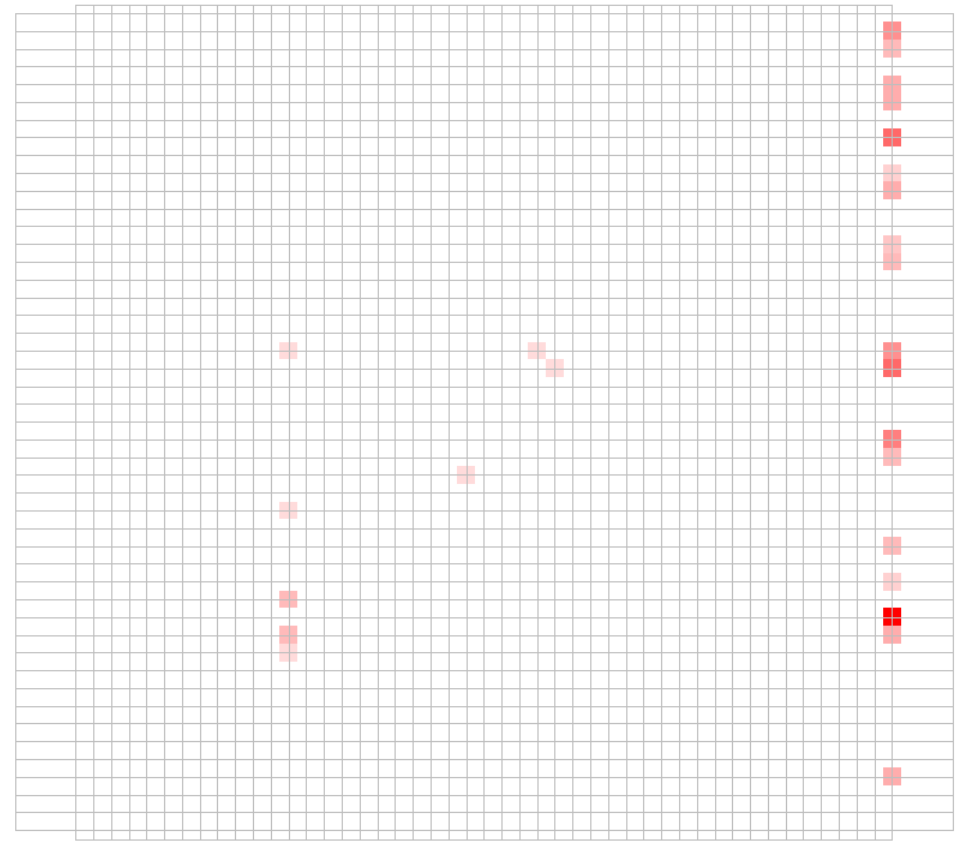
log(Edge Frequency) 2021-12-22



ここから

$\log C$

log(Count x Frequency) 2021-12-22

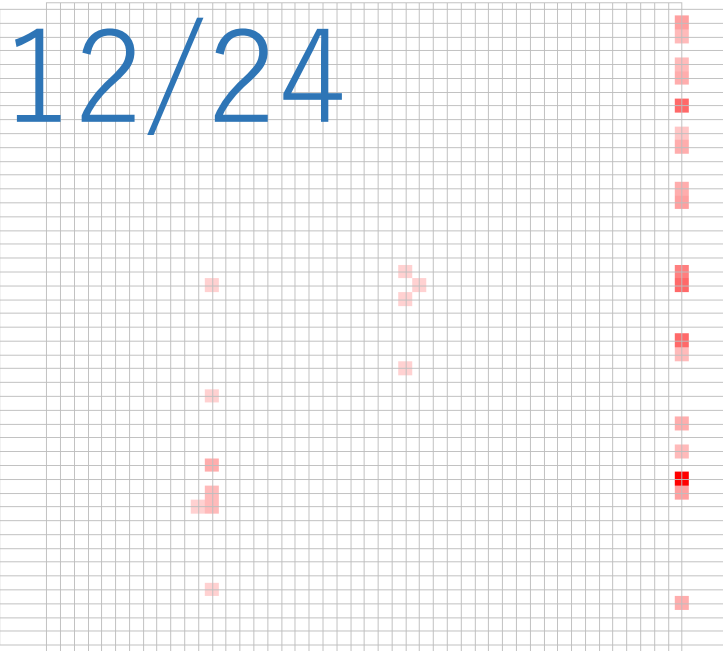


from

感染者の流入

log(Edge Frequency) 2021-12-24

北青岩宮秋山福茨栃群埼千東神新富石福山長岐静愛三滋京大兵奈和鳥島岡広山徳香愛高福佐長熊大宮鹿冲

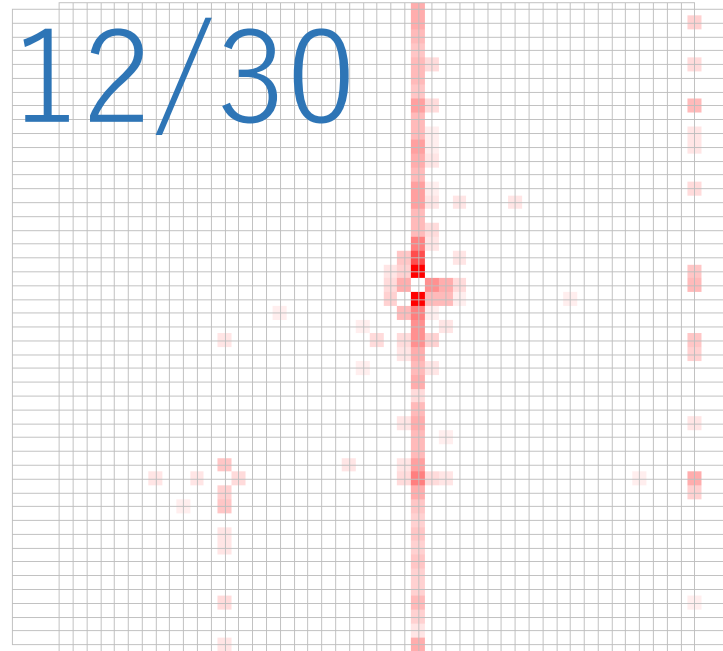


北青岩宮秋山福茨栃群埼千東神新富石福山長岐静愛三滋京大兵奈和鳥島岡広山徳香愛高福佐長熊大宮鹿冲

from

log(Edge Frequency) 2021-12-30

北青岩宮秋山福茨栃群埼千東神新富石福山長岐静愛三滋京大兵奈和鳥島岡広山徳香愛高福佐長熊大宮鹿冲

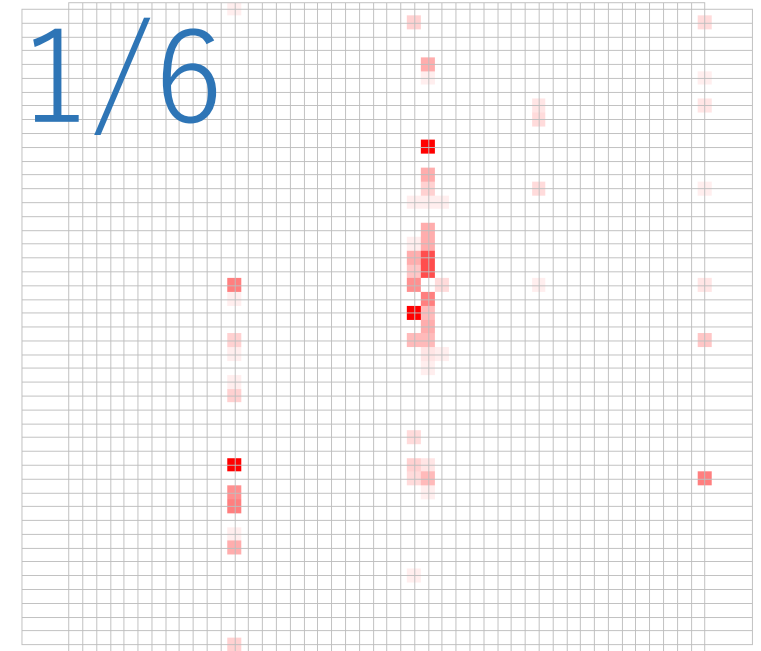


北青岩宮秋山福茨栃群埼千東神新富石福山長岐静愛三滋京大兵奈和鳥島岡広山徳香愛高福佐長熊大宮鹿冲

from

log(Edge Frequency) 2022-01-06

北青岩宮秋山福茨栃群埼千東神新富石福山長岐静愛三滋京大兵奈和鳥島岡広山徳香愛高福佐長熊大宮鹿冲



北青岩宮秋山福茨栃群埼千東神新富石福山長岐静愛三滋京大兵奈和鳥島岡広山徳香愛高福佐長熊大宮鹿冲

from

- ・ 沖縄から主要都市圏へ（閉鎖系を仮定したartifactもある）
- ・ 年明け直前に京阪神から強い供給
- ・ 首都圏が供給力を持つのは年明けから

フィルタ分布の平均軌道 (参考)

[illegible]

まとめ: 2020年の初期の流行

- 人の移動を考慮したSIRモデルによる, COVID-19国内流行の記述可能性を調べる数値実験を行った
- 結果と課題:
 - ○ 大・中都市の流行は再現可能である.
 - △ 小都市はある程度再現可能であるが, 定量的には課題が残る.
 - × 妥当な予測を与える期間は短い (~1週間)

まとめ: オミクロン株の国内流入

- 令和3年末から4年始にかけてのオミクロン変異株の国内流入と全国への急速な拡散の経過を観察した
 - 京阪神での安定的再生産の急速な確率
 - $R_0 = 1.43-1.85$ (世代時間の不定性) と成長は強い
- SIRモデルとの照合と流入の可視化
 - データからある程度想像できるが、やはり京阪神から拡散
 - 首都圏の寄与は小さかった