

PCATSを用いた都市圏における 感染症拡大シミュレーションの構築

塩見 康博¹・菊池 輝²・矢野 晋哉³・佐々木 邦明⁴

¹正会員 立命館大学准教授 環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail: shiomi@fc.ritsumeai.ac.jp

¹正会員 東北工業大学教授 工学部都市マネジメント学科(〒982-8577仙台市太白区八木山香澄町35-1)

E-mail: akikuchi@tohtech.ac.jp

¹正会員 社団法人システム科学研究所 (〒604-8223 京都市中京区新町通四条上ル小結棚町428)

E-mail: yano@issr-kyoto.or.jp

¹正会員 早稲田大学創造理工学部教授 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail: sasaki.k@waseda.jp

感染症は人の活動と移動に伴って時間的・空間的に感染地域が広がる。そのため、人々の移動と活動を抑制することで感染拡大を抑止する方策がとられる。実際、COVID19パンデミックにおいては、その第1波の際に各種活動の自粛を抑制する方針がとられ、一定の抑制効果が確認された。その一方で、社会・経済活動の著しい停滞の観点から、全国一律に8割を目標とする自粛に対する批判も少なくない。今後の第2波、第3波の到来を考慮すると、可能な限り経済的な影響を小さくとどめた上で、有効な活動制限方策を模索する必要がある。そこで、本研究では、生活行動シミュレーターにSEIRモデルに基づく感染伝播モデルを実装したシミュレーションを構築する。これを用いて都市圏での人々の活動を介して感染が拡大していく過程をシミュレートすることで、感染拡大を抑制する政策の検討・評価を行う。

Key Words: *pcats, pandemic simulation, SEIR model, covid-19, self-restraint request*

1. はじめに

感染症は人類の生存を脅かす脅威である。人類と感染症の歴史は古く¹⁾、天然痘、ペスト、インフルエンザなどはこれまでも地域的・世界的に流行し、多くの死亡者がでていた。近代以降は医学の発展によるワクチンの開発や抗生物質の発見により、予防・治療が可能となった。しかしながら、近年ではエボラ出血熱、エイズ、重症急性呼吸器症候群（SARS）、中東呼吸器症候群（MERS）などの新興感染症が数多く発生していることより、ワクチンや治療法が確立されていない限りにおいては、将来的にも依然として人類の脅威であり続けることは想像に難くない。実際、2019年12月、中国の武漢に端を発する新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は世界的な大流行（パンデミック）となり、2020年9月16日時点において2957万人が感染、93万人が死亡しており²⁾、9月13日時点では24時間に報告された新規感染者数が30万超と過去最多を更新³⁾したことが報道されている。

Covid-19は感染力が高く、人の移動に伴って時間的・

空間的に感染地域が広がる。そのため、都道府県をまたぐ不要不急の移動の自粛を要請することにより、感染拡大を抑止する方策がとられた。また、感染拡大の第1波の際には2020年4月7日に緊急事態宣言が発令され、全国一律に活動レベルを8割削減する方針がとられた。この宣言は5月7日に延長され、5月25日に全国で解除された。これによりピーク時の4月10日には708名の新規陽性者が報告されたものの、5月25日には20名に抑えられ、感染拡大の抑止には一定の効果があったものと考えられる。

その一方で、社会・経済活動の著しい停滞の観点から、全国一律の活動自粛に対する批判的な意見も多く、今後の第2波、第3波の到来を考慮すると、可能な限り経済的な影響を小さくとどめた上で、有効な活動制限方策を模索する必要がある。また、宮沢⁴⁾が指摘するように、個人の振る舞いや活動環境の整備により感染リスクを弱めることも可能であるため、必ずしも移動・活動の自粛だけが感染抑制対策となる訳ではない。そのため、感染しない／させないための対策と合わせて実施することにより、社会経済活動と感染対策を両輪で行うためには重

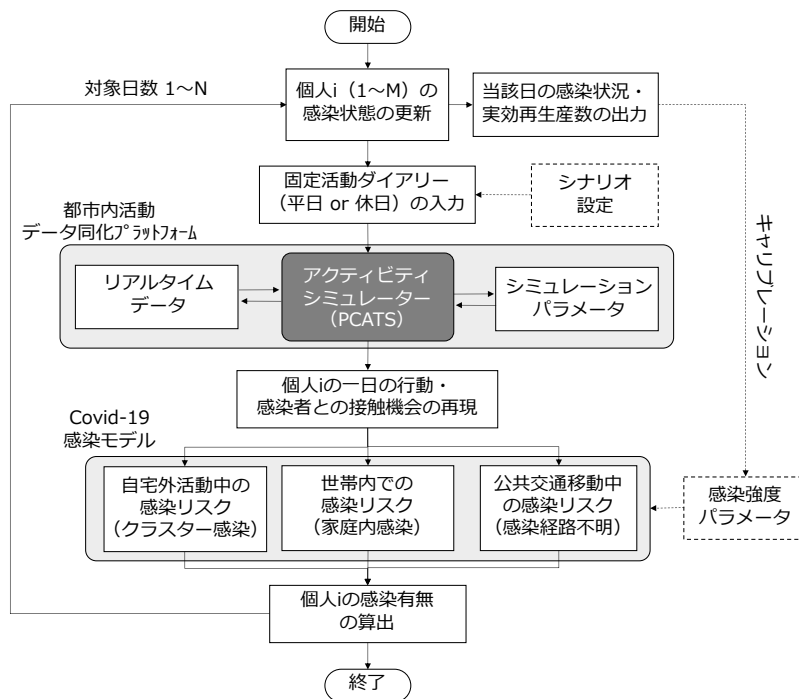


図-1 シミュレーションの計算フロー

要となろう。しかしながら、移動の自粛と活動中の感染対策それぞれの感染拡大抑制効果を定量的に計測することは難しい。今後の Covid-19 を含む新興感染症のさらなる感染拡大リスクに対し、各種施策効果を事前に評価するため、あるいは事後的に検証するための確固たるツールが現時点では存在しないのが現状である。

そこで本研究では、感染症が人々の活動を介して感染し、移動に伴って時空間的に拡大する過程を計算するシミュレーションモデルを構築することを目的とする。移動・活動過程については、生活行動シミュレータ *pcats* (*Prism-Constrained Activity-Travel Simulator*) を用いる。*pcats* は、個人ごとに目的地選択・時間配分・交通手段選択モデルを適用し、当該エリアにおける個人の 1 日の行動を計算するものである。本研究では、ここに感染シミュレータ (以降、*icats* (*Infection-Activity Simulator*) と呼称する) を融合させる。*icats* では、自宅外活動、移動中、自宅内の 3 つの感染ケースを考慮し、前者 2 つに関しては当該空間での人口密度と感染者数の関係で確率的に感染する過程をモデル化する。これを *Day to Day* で計算を行うことにより、感染症の拡大をシミュレートする他、各種施策の評価を可能とする。また、*pcats*、および *icats* ともに、ダイナミックな状態変化を的確に再現できるよう、空間統計データや感染状況の統計データと同化できるよう拡張性を持たせるものとする。本稿では、構築するシミュレーションである *pcats-icats* システムの概要を述べるとともに、近畿圏に適用することで、その計算結果の *verification*、およびパラメータに対する感度分析の結果を報告する。

論文の構成は以下の通りである。本章では研究の背景と目的を述べた。第 2 章では構築するシミュレーションモデルの概要と数値計算アルゴリズムを述べる。第 3 章ではシミュレーションの条件設定やデータの詳細を整理し、第 4 章にてシミュレーション結果を述べる。最後に、第 5 章で結論と今後の展望をまとめる。

2. *pcats-icats* システムの概要

本研究で構築するシミュレーションは 1 日の個人の交通行動を算出する *pcats* と各種アクティビティに伴って感染する過程を算出する感染モデルによって構成される。シミュレーションの全体構成のフロー図を図-1 に示す。シミュレーションは 1 日単位で行い、個人行動に関するシナリオを与えた上で、*pcats* により各個人の 1 日の行動軌跡を出力する。それをシミュレーション対象となる全個人に関して集約し、時間帯ごとの各ゾーンの滞在人数、および、公共交通リンクごとの利用者人数を算出する。その中に感染者が混入し、活動や移動による接触を通して、個人ごとの感染有無が算出され、その結果が 1 日ごとに集計されることとなる。この一連の計算を対象日数分を行うことで、感染の広がりをシミュレートする。

以下では、シミュレーションの核となる、都市内活動データ同化プラットフォーム、および Covid-19 の感染モデルについて詳細を述べる。

(1) アクティビティシミュレーション

個人の活動をシミュレーションするにあたり、本研究

では藤井ら⁹⁾により開発された *pcats* を用いる。これは、個人の時間制約のもとで実施しうる固定活動（通勤・通学など）と自由活動の実施場所とそこへの移動を繰り返し計算し、1日の行動軌跡を出力する。具体的には、個人の活動に関する活動内容選択、活動場所選択、活動時間選択、交通機関選択をプリズム制約の中で繰り返すため、各選択モデルに関するパラメータを設定する必要がある。また、自宅ゾーン・固定活動ゾーンを含む個人属性、自動車・公共交通・その他交通期間の所要時間や運賃などのサービスレベル値、および対象とするゾーンの人口や事業所数、面積といった属性値を入力とする。シミュレーションを実行することで、1日（午前3時～翌午前3時）の活動場所ゾーンと活動施設（自宅、仕事先、学校等、送迎先、不明）、活動内容（就学先活動、就業先活動、業務、宅外自由活動、自宅活動、不明、時間調整、送迎）、活動開始・終了時刻、移動手段（公共交通、自動車、その他）、移動開始・終了時刻が個人ごとに出力される。

pcats はこれまでも交通需要予測のほか、消防防災拠点評価、交通部門の環境影響評価などにも適用されている。また、近年では空間統計データを活用し、時間帯ごとのゾーン滞留人口の観測値と推定値の類似度を高めるようにパーティクルフィルタを実装した事例¹⁰⁾や、*pcats* を上位モデル、交通量配分を下位モデルとして空間統計データとの同化を行うことで日交通量の再現精度の向上を図った事例⁷⁾など、*pcats* をシステムモデルとして活用したデータ同化事例も報告されている。

2020年のCovid-19パンデミック時には、活動の自粛要請やテレワークへの移行により、人々の活動特性は通常時と大きく変容した。そのため、需要の変動を詳細にシミュレートするにあたって、活動自粛率（あるいはテレワーク移行率）を未知パラメータとして導入し、空間統計データなどと同化させることで、精度の高いシミュレーションが実現するものと考えられる。

(2) 感染シミュレーション (icats)

a) モデルの概要

感染症の流行過程を記述するモデルの主要なものとしては SIR モデルが広く知られている。これは、個体の状態が非感染個体 (S, susceptible)、感染個体 (I, infectious)、回復個体 (R, recovered) と遷移すると仮定し、式(1)に示す連立微分方程式により時間変化に対する感染者数の増減を記述したものである。

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta S(t)I(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 β は感染率、 γ は回復率・隔離率を表すパラメータである。また、潜伏期間を考慮し、感染待ち時間 (E, Exposed) を考慮した SEIR モデルへと拡張される。

このモデルは、*covid-19* パンデミック時においても 8割の活動制限目標の理論的背景として用いられた。しかしながら、このモデルでは感染者と非感染者との接触の均一性を仮定しており、現実的な人々の活動と感染リスクの関係を仮定したものではなく、また個体による異質性も考慮できない¹¹⁾、という点で必ずしも実現象を的確に表したものとはいえない。

そこで本研究では、活動における感染者との暴露量に応じて感染リスクを定義し、それに基づいて1日の活動全体を通しての感染確率を求めるモデル構造とする。まず、個人の感染状態は1:非感染（感染の可能性がある状態）、2:潜伏（発症はしていないものの、他者に感染させる可能性のある状態）、3:発症（発症し、病院などに隔離されている状態）、4:回復（免疫を獲得し、日常生活に復帰している状態）、5:死亡（発症ののち、死亡した状態）の5段階に分類され、各状態はマルコフ性をもって遷移していくと仮定する。このとき、潜伏状態にある個人は日常の活動を行うため、非感染者に感染させる可能性があるとして想定する。

次に、感染経路としては、自宅外でのアクティビティ中、世帯内、移動中を想定する。なお、移動中の感染については、その確たる事例は報告されていないが、電車内の混雑は感染リスクが高まるとされる「3密」に該当する可能性があり、車内混雑を緩和させる施策による感染リスクの低減効果などを評価するため、感染経路の1つとして考慮する。

その上で、感染経路における1日の活動での感染確率、すなわち非感染状態から潜伏状態への遷移確率を以下の通りに算出する。

自宅外活動における感染確率

pcats では対象エリア内のゾーンでの滞在時間が各個人について計算される。その中には潜伏期間にある個人も存在し、それに伴って非感染者へ感染するものとする。その際、ゾーン内の人口密度が高い場合、必然的に人と人との距離が短くなり、また、感染者数が多いほど感染症への曝露量が増加するため、感染確率が高くなることが想定される¹²⁾。また、1日の中での暴露量は加法的に感染確率に影響すると仮定する。このとき、 d 日目における、対象とする個人 i の活動集合を Z_i^d 、活動 j ($\in Z_i^d$)

の開始時刻・時刻をそれぞれ t_{ij}^s, t_{ij}^e 、活動 j が行われるゾーンにおける活動中の平均滞在人口を N_{ij}^o 、そのうち、潜伏状態にある感染者の割合を r_{ij}^o 、活動が行われるゾーンの面積を A_j とする。このとき、個人 i の当該日の感染確率 p_{oi}^d を式(2)として定義する。

$$p_{oi}^d = \min \left(1, \beta \sum_{j \in Z_i^d} R_{oij} \right) \quad (2)$$

ただし、 β はウイルス固有の感染率を表す。 R_{oij} は個人 i の活動 j におけるウイルスへの暴露量であり、式(3)のように記述する。

$$R_{oij} = r_{oij} \cdot \left(\frac{(t_{ij}^e - t_{ij}^s) \cdot N_{oij}}{r_{o\max} \cdot A_j} \right)^{\alpha_{oj}} \quad (3)$$

ここで、 $r_{o\max}$ は活動中の感染強度パラメータを表し、感染対策がなされるほど、大きい値をとるものとする。 α_{oj} は人口密度に対するべき乗パラメータを表し、ゾーン内の土地利用特性に応じて決定されるとする。

世帯内における感染確率

世帯内に感染者がいる場合、非感染者のリスクは高くなる。そこで、 d 日目の個人 i の世帯内における感染確率 p_{Hi}^d は式(4)で表す。

$$p_{Hi}^d = 1 - \prod_{j \in H_i} (1 - p_{ij}) \quad (4)$$

ここで、 H_i は個人 i が同居する世帯構成員の集合、 p_{ij} は世帯構成員 j からの感染確率を表し、

$$p_{ij} = \begin{cases} \pi_{ij} \beta & \text{if } j \in E^d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

と記述する。ただし、 π_{ij} は個人 j から個人 i への暴露量、 E^d は d 日目における潜伏状態にある個人の集合を表す。

公共交通移動中の感染確率

本研究では、感染経路不明という状況を公共交通移動中での感染とみなす。これは、必ずしも車両内での感染のみを表すものではなく、駅空間などの人が密集する状況での感染可能性を表現することを意図している。

個人 i の活動 j への移動が公共交通でなされる場合、暴露量は加法性があると仮定すると、 d 日目における公共交通移動による感染確率 p_{Pi}^d は式(6)の通りに記述される。

$$p_{Pi}^d = \min \left(1, \beta \sum_j R_{Pj} \right) \quad (6)$$

ここで、 R_{Pj} は活動 j への移動中における暴露量を表し、

$$R_{Pj} = \sum_{k \in L_j} r_k^p t_k \left(\frac{N_{Pk}}{r_{P\max}} \right)^{\alpha_P} \quad (7)$$

と記述される。ここで、 L_j は活動 j への移動中に通過する駅間リンクの集合、 r_k^p は駅間リンク k の車内における感染者割合、 t_k は駅間リンク k の移動時間、 N_{Pk} は駅間リンク k の乗車人数、 α_P は車内混雑に対するべき乗パラメータをそれぞれ表す。 $r_{P\max}$ は乗車中の感染強度パラメータであり、この値が大きいほど、感染対策がなされていると解釈できる。

b) 数値計算方法

自宅外活動における感染確率

式(3)に含まれる r_{oij} 、および N_{oij} は、時刻 t にゾーン j に滞在し、自宅活動以外を行っている全個人数を $N_{ij}(t)$ 、そのうち、潜伏期間にある個人数を $n_{ij}(t)$ とすると、それぞれ、

$$N_{oij} = \int_{t_{ij}^s}^{t_{ij}^e} N_{ij}(t) dt \quad (8)$$

$$r_{oij} = \frac{\int_{t_{ij}^s}^{t_{ij}^e} n_{ij}(t) dt}{N_{oij}} \quad (9)$$

と求まる。しかしながら、シミュレーション上でこの値を求めるのは計算負荷が高くなる。そこで、時間を離散化し、全個人の活動データに基づいて時間帯ごとの平均滞在人数 $N_{ij}(t)$ と平均感染者人数 $n_{ij}(t)$ の近似値を予め導出する。それに基づき、近似的に個人 i の活動時間中の暴露量を導出する。感染確率の具体的な計算方法は以下の通りである。

STEP 1. 時刻 t 、ゾーン j の平均滞在人数 $N_o[t, j]$ と平均感染者人数 $n_o[t, j]$ の配列の初期化

STEP 2. 平均滞在人数と平均感染者人数の算出

- ・ 個人 i のループ
- 活動 j のループ

$$N_o[l-1, j] = N_o[l-1, j] + \frac{l\Delta t - t_{ij}^s}{\Delta t}$$

$$N_o[m, j] = N_o[m, j] + 1, \text{ if } n-1-l \geq 1$$

$$N_o[n-1, j] = N_o[n-1, j] + \frac{t_{ij}^e - (n-1)\Delta t}{\Delta t}$$

where

$$\begin{cases} (l-1)\Delta t \leq t_{ij}^s < l\Delta t \\ (n-1)\Delta t < t_{ij}^e \leq n\Delta t \\ l, m, n \in \mathbb{N} \end{cases}$$

- $i \in E$ の場合:

$$n_o[l-1, j] = n_o[l-1, j] + \frac{l\Delta t - t_{ij}^s}{\Delta t}$$

$$n_o[m, j] = n_o[m, j] + 1, \text{ if } n-1-l \geq 1$$

$$n_o[n-1, j] = n_o[n-1, j] + \frac{t_{ij}^e - (n-1)\Delta t}{\Delta t}$$

STEP 3. 個人*i*の暴露量 R_{Oij} の近似値を以下で求め、感染確率を算出する。

$$\tilde{R}_{Oij} = \sum_{k=l-1}^{n-1} \frac{n_o[k, j]}{N_o[k, j]} \cdot \left(\frac{N_o[k, j]}{r_{Omax} A_j} \right)^{\alpha_{Oj}}$$

公共交通移動中の感染確率

式(7)を算出するためには、各個人が乗車する車両を特定することが必要となるが、pcatsでは移動開始時刻と移動終了時刻を算出するのみである他、公共交通のサービスレベルは運賃・移動時間・乗り換え回数のみで決定される。そのため、具体的に乗車する車両を特定することはできない。そこで、自宅外活動における感染確率を算出するときと同様に、時間を Δt 間隔で離散化し、ゾーン間 OD に対応した路線における駅間リンクの利用人数とそのうちの感染者数を集計し、近似的に p_{Pi}^d を導出する。

時刻*t*における駅間リンク*l*の利用者数を $N_p[t, l]$ 、そのうちの感染者数を $n_p[t, l]$ 、個人*i*のトリップ*j*における出発時刻と到着時刻をそれぞれ τ_{ij}^s 、 τ_{ij}^e とすると、感染確率の具体的な計算方法は以下の通りとなる。ただし、演算記号 $\|\cdot\|$ は集合の要素数を表す。

STEP 1. 時刻*t*、駅間リンク*l*の利用者数 $N_p[t, l]$ と感染者人数 $n_p[t, l]$ の配列の初期化

STEP 2. リンク利用者数と感染者人数の算出

- ・ 個人*i*のループ
 - トリップ*j*のループ
 - トリップ*j*に含まれる公共交通リンク集合 L_{ij} の要素に関するループ

$$N_p[t_{ij}, l] = N_p[t_{ij}, l] + \frac{\tau_{ij}^e - \tau_{ij}^s}{\|L_{ij}\|}, l \in L_{ij},$$

where

$$\begin{cases} (t_{ij} - 1)\Delta t \leq \tau_{ij}^e < t_{ij}\Delta t \\ t_{ij} \in \mathbb{N} \end{cases}$$

- $i \in E$ の場合

$$n_p[t_{ij}, l] = n_p[t_{ij}, l] + \frac{\tau_{ij}^e - \tau_{ij}^s}{\|L_{ij}\|}, l \in L_{ij}$$

STEP 3. 個人*i*の暴露量の近似値を以下で求め、感染確率を算出する。

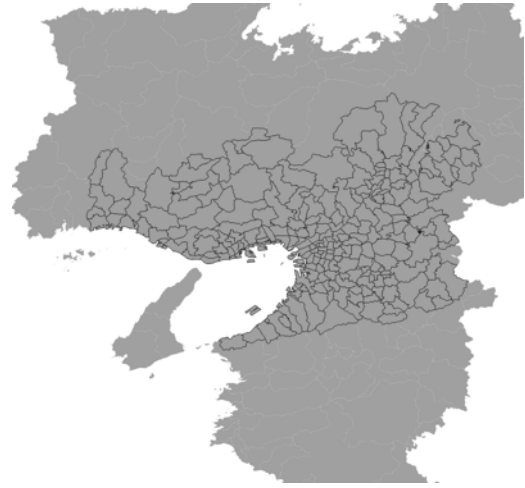


図-2 シミュレーション対象ゾーン（黒枠のエリア）

$$\tilde{R}_{Pj} = \sum_{l \in L_{ij}} \frac{n_p[t_{ij}, l]}{N_p[t_{ij}, l]} \cdot \frac{\tau_{ij}^e - \tau_{ij}^s}{\|L_{ij}\|} \cdot \left(\frac{N_p[t_{ij}, l]}{r_{Pmax}} \right)^{\alpha_p}$$

3. シミュレーションの条件設定

本研究ではケーススタディとして近畿圏を対象として感染症の拡大過程をシミュレートする。具体的には、公共交通ネットワークにより大阪・神戸・京都へのアクセスが容易であり、県境を越えた移動が多いと考えられる滋賀県・京都府・大阪府・兵庫県・奈良県の242の小ゾーン（図-2）を対象とする。

(1) pcatsの設定

pcatsは入力データとして各個人の居住地、就学就業地、固定活動などを整理した PERSON.txt、交通手段別のゾーン間のサービスレベルをまとめた LOS.txt、各ゾーンの人口、事業所数、面積をまとめた LANDUSE.txt、および各選択モデルのパラメータ値を設定する必要がある。以下、それぞれの設定方法を述べる。

a) PERSON.txt の設定

PERSON.txt で必要となる項目は以下の通りである。

個人 ID/カテゴリ（就業者、就学者 or その他）/居住地/就業就学地/性別/年齢/職業/免許保有/自動車保有台数/拡大係数/5歳以上人数/就業者人数/高校生以上学生人数/中学生以下学生人数/世帯主年齢/世帯主性別/固定活動内容/活動開始時刻/活動終了時刻/活動場所ゾーン

これらの設定に当たっては、当該エリアにおける現時点（2020年9月）で最新のパーソントリップ調査である

第 5 回（平成 22 年）近畿圏パーソントリップ調査のデータ（PT データ）を用いる。具体的には、対象ゾーン内に居住地と就業就学地がある個人の平日のトリップを抽出した。また、活動開始時刻が午前 3 時以前、活動終了時刻が午前 3 時以降の場合には、便宜上、午前 3 時から活動開始、午前 3 時に活動終了したものとした。その結果、836,127 人、2,410,493 トリップを PERSON.txt として設定した。

b) LOS.txt の設定

LOS.txt を設定する上で必要となるデータは以下の通りである。

発ゾーン番号／着ゾーン番号／公共交通所要時間／公共交通料金／公共交通乗り換え回数／自動車所要時間／その他交通機関所要時間／ゾーン間距離

公共交通 LOS

ゾーン間の公共交通の所要時間・料金・乗り換え回数は以下の方法で求めた。なお、算定にあたっては 2015 年度の鉄道網、時刻表データ、運賃（8%税込）、人口のデータに基づいている。

- ① PT 小ゾーンに含まれる町丁字人口（常住人口）を加味してゾーン中心を設定
- ② ゾーン中心からアクセス可能鉄道駅へのアクセスデータ作成
 - 1) ゾーン内に位置する全駅
 - ・アクセス時間、費用は PT 結果より集計（加重平均）
 - 2) ゾーン内の駅数が 2 未満の場合、PT 集計によりアクセス交通量の多い順に、計 2 駅まで追加
 - ・アクセス時間、費用は PT 結果より集計（加重平均）
 - 3) PT 結果で全く駅利用が無いゾーンは、直線距離で最も近い駅を設定
 - ・アクセス距離は直線距離
 - ・アクセス距離が 1km 内は徒歩、2km 内は二輪、2km 超は路線バスと考えアクセス時間と費用を算定
- ③ ゾーン間鉄道経路の作成と所要時間、費用の集計
 - ・発ゾーンアクセス可能駅×着ゾーンイグレス可能駅で経路設定
 - ・各駅間の組み合わせで経路設定し最短経路探索
 - ・最短経路探索は、終日の鉄道系統データ（2015 年 10 月）を用い、乗換時間、乗継時間、列車待ち時間考慮。有料特急・新幹線は除く。
 - ・各駅間の所要時間（待ち時間等含む）とアクセス時間、イグレス時間の和が最小の経路をゾーン間の最適経路とし、所要時間と費用を算出
 - ・指定された小ゾーン（242 ゾーン）間で OD データ作成
 - ・ラインホールの所要時間は往復の平均とし、三角表で作成

自動車 LOS

大竹・菊池（2019）では、pcats と交通流シミュレータが融合され、pcats で算出されたゾーン間交通量が動的に道路ネットワークに配分され、それが自動車の LOS として pcats の入力としている。しかしながら、本研究では感染拡大過程を対象日数分繰返し計算するため、計算負荷を極力減らすことを目的に、OD 交通量によらず自動車 LOS は一定であると仮定する。その上で、ゾーン間所要時間は平成 27 年ネットワークを用いた高速転換率併用分割配分により算出した。

その他交通機関所要時間・ゾーン間距離

その他交通機関については、PT の結果に基づき、ゾーン間の所要時間の平均値を設定した。ゾーン間距離は、ゾーン中心間の直線距離を GIS より算出した。ただし、同一ゾーン内の移動に関しては、PT の集計ルールに基づき、一律で 5km と設定した。また、PT では観測されていないゾーン間の所要時間は直線距離と所要時間の関係から推計した。

c) LANDUSE.txt の設定

LANDUSE.txt として整理するデータは以下の通りである。

ゾーン面積（km²）／人口／サービス事業所数／人口密度／サービス事業所数密度

ゾーン面積については、GIS を用いて小ゾーンの面積を求めた。人口は 2015 年センサスにおける町長字人口、サービス事業所数は 2013 年経済センサス活動調査データベースより集約した。

d) 選択モデルパラメータの設定

pcats は、内部モデルとして想定時間分布モデル、活動内容選択モデル、交通機関・目的地選択モデルにより構成されている。これらは、第 4 回京阪神パーソントリップ調査に基づいて推定された値がプリセットされている。本研究では、パラメータ推定の対象地域が同一であり、土地利用と交通 LOS についてはアップデータされた数値が設定されていることから、プリセットされたパラメータをそのまま用いることとした。

(2) icats の設定

icats では、感染確率の算定に関わるパラメータ、感染後の症状に関わるデータ、初期条件などを設定する必要がある。また、pcats では対象エリアの中で、パーソントリップ調査の対象としてサンプリングされた個人について計算が行われる。そのため、サンプリングデータを拡大するための方法についても述べる。

a) 感染確率に関するパラメータ

感染確率を算定する上では、ウイルス固有の感染率 β 、活動中・移動中の感染強度を表す R_{Omax} と R_{Pmax} 、世帯

表-1 症状パラメータの設定

	10代未満	10代	20代	30代	40代	50代	60代	70代	80代以上
無症状率 [%]					0.80				
軽症率 [%]	19.5	19.7	19.9	19.6	18.0	17.2	11.9	8.4	4.9
重症率 [%]	0.5	0.3	0.1	0.3	1.7	2.3	6.2	5.7	3.0
死亡率 [%]	0	0	0	0.1	0.2	0.5	1.9	5.9	12.1
軽症時隔離期間 [日]					22				
重症時隔離期間 [日]					14				

表-2 潜伏期間分布

	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日	8日	9日	10日	11日	12日	13日	14日
累積確率	0	0	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	0.75	0.80	0.85	0.9	0.95	1.0

内での感染者への暴露量を表す係数である π を設定する必要がある。このうち、 R_{Omax} , R_{Pmax} , π は感染経路別の感染者数の観測値に基づいてキャリブレーションされる^{註2)}。また、 $pcats$ をシステムモデルとしてデータ同化をした場合には、 $icats$ も連動してこれらのパラメータをパーティクルとして観測値に同化させることで、感染対策効果の変動を推定することができる。

β はウイルス固有の値であり、流行終焉時の感染者割合を p とした場合、 $-\log(1-p)$ で近似される⁸⁾。そこで、Covid-19に関しては、集団免疫を獲得するのに必要な感染者数は5割かそれ以下、とする新聞報道⁹⁾に基づき、 $\beta = 0.25$ する。

また、 $covid-19$ では、発症前後の時期に最も感染力が高くなる、との報告を踏まえ、ゾーン j の感染者数を求める際には、感染者 i の潜伏期間残日数 δ_i を考慮し、 $1/\delta_i$ で重み付けをする。加えて、 $pcats$ では各個人に対し、拡大係数 γ_i が設定されている。そのため、滞在人数や感染者数は拡大した値を用いる。さらに、拡大係数の影響を考慮するため、各個人の感染確率はそれぞれ γ_i 倍する。

b) 症状に関するパラメータ

症状に関しては、年齢別死亡率、重症率、軽症率、無症状率、軽症・重症時の隔離日数、潜伏期間分布を設定する必要がある。本研究では、各種の報告を参照し、それぞれ表-1、表-2の通り設定する。

c) 初期条件・境界条件

初期条件として、 $covid-19$ パンデミックの際に出国制限が開始された2020年3月21日の状況を設定する。この時点では、都市圏の移動の自粛要請が出ており対象ゾーン外からの人の流入はないものと仮定する。同3月21日時点で各府県の累積感染者数は滋賀県で4人、京都府で19人、大阪府で108人、兵庫県で81人、奈良県で4人となっている。これより、PTのサンプリングレート、および無症状率などを考慮して、各府県よりそれぞれ1人、5人、27人、20人、1人をランダムに抽出し、潜伏状態にあるとした。

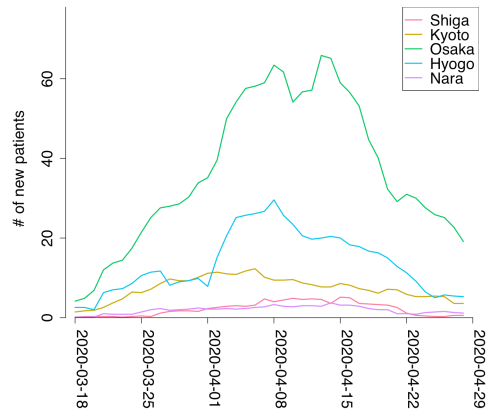


図-3 対象エリアにおける新規感染者数の推移 (7日間移動平均)

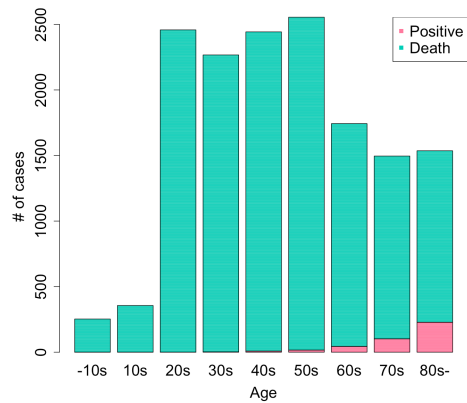


図-4 年齢別陽性者数と死亡者数 (5月7日現在)

4. シミュレーション結果

上記の設定のもと、 $pcats-icats$ を実行し、シミュレーションの妥当性の検証、およびパラメータの感度分析を行う。

(1) $icats$ の設定

$pcats-icats$ システムの挙動の妥当性を検証するため、実観測データの感染拡大状況を定性的に再現することを目的とする。そこで、観測された府県ごとの新規感染者数

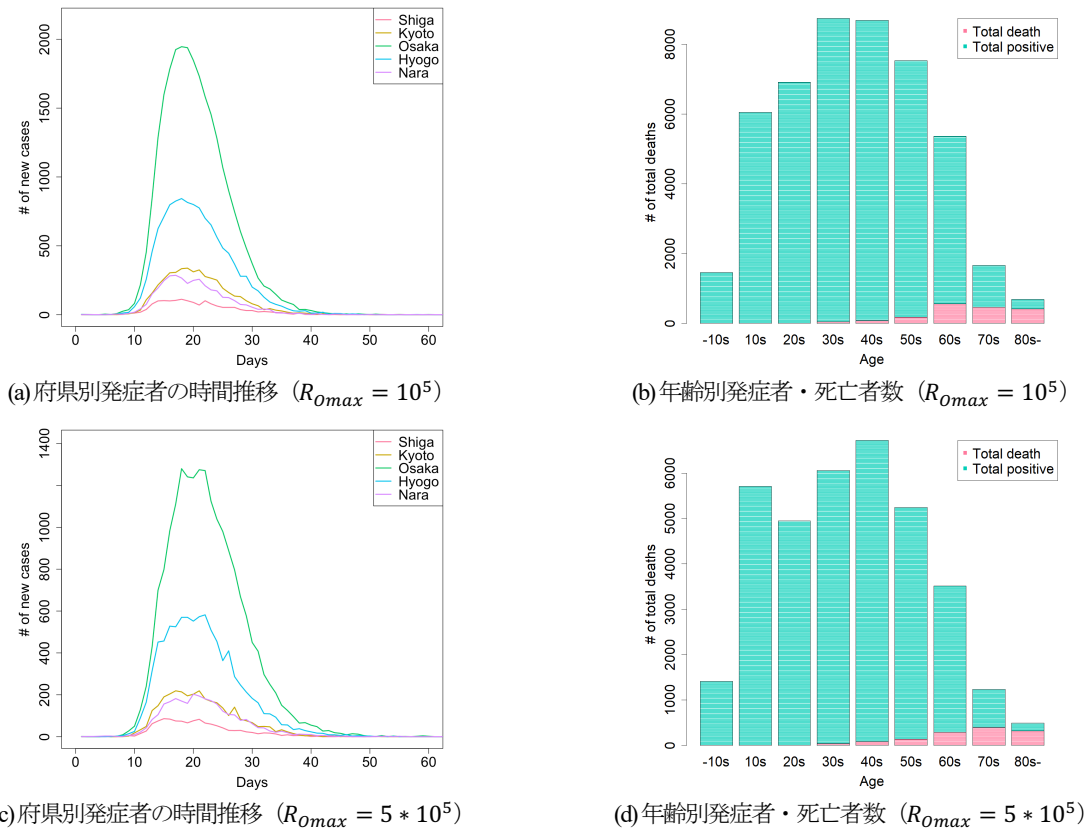


図-5 自宅外活動感染強度パラメータの感度分析

の推移¹⁰⁾ (図-3), および年齢別の感染者数と死亡者数¹¹⁾ (図-4) の傾向に合致するよう, 試行錯誤的に R_{0max} , R_{Pmax} , π を調整した. なお, 定量的に観測値とシミュレーション値を合わせるためには, icats のパラメータだけではなく, テレワーク移行率や活動自粛率, 感染予防のための公共交通から自動車への交通手段の変容などを考慮する必要がある. これらは空間統計データなどを用いて pcats をシステムモデルとしてデータ同化させることで考慮することが可能と考えられるが, 本研究の今後の課題とする.

(2) シミュレーションの実行とパラメータ感度分析

上記の設定のもと, R_{0max} , R_{Pmax} , π に関する感度分析を行う.

a) 自宅外活動感染強度パラメータ (R_{0max})

$R_{Pmax} = 5000$, $\alpha_O = \alpha_P = 1.0$, $\pi = 0.5$ と設定した上で, 自宅外活動感染強度を表すパラメータ, R_{0max} を 10^5 , および $5 * 10^5$ としたときの府県別新規感染者数の推移, および年齢別の感染者数の算出結果をそれぞれ図-5 に示す.

まず, シミュレーション結果より, 感染者数は大阪, 兵庫, 京都, 奈良, 滋賀の順で小さくなっていくことが分かり, 値の範囲は異なるものの, 図-3 と同様の傾向にあることが分かる. 一方, 年齢別発症者数については, 実測と比べて 10 代が過大に, 70 代以上を過小に推計し

ていることが分かる.

また, パラメータの値に関して, 全体の感染者数は R_{0max} の増加に伴い減少することが分かる. それに伴い, 年齢別の発症者数にも変化が見られ, 10 代が相対的に感染者の割合が多くなっていることが分かる. これは, R_{0max} を大きくすることで, 自宅外活動における感染が減少した一方, 自宅内での活動が多い 10 代以下の感染者数が相対的に増えたものと考えられる.

b) 公共交通移動中感染強度パラメータ (R_{Pmax})

$R_{0max} = 10^6$, $\alpha_O = \alpha_P = 1.0$, $\pi = 0.25$ と設定した上で, 公共交通移動中感染強度パラメータである R_{Pmax} を $2 * 10^4$, および $3 * 10^4$ としたときの府県別新規感染者数の推移, および年齢別の感染者数の算出結果をそれぞれ図-6 に示す.

全体的な傾向はパラメータの値によらず大きな差異はないが, R_{Pmax} を大きく設定するほど, ピーク時の 1 日の新規発症者の数が少なくなることが分かり, 移動中の感染を抑制する傾向にあることが分かる. また, 図-5 との比較では, 10 代の感染者の相対的な割合がさらに大きくなっていることが分かる. これは, R_{0max} を 10^6 と大きい値に設定したため, 全体的に感染者数が減少している他, 世帯内での感染が相対的に多くなったためであると考えられる.

c) 世帯内感染強度パラメータ (π)

π 以外のパラメータを図-6 の (b), (d) と同様に設定した

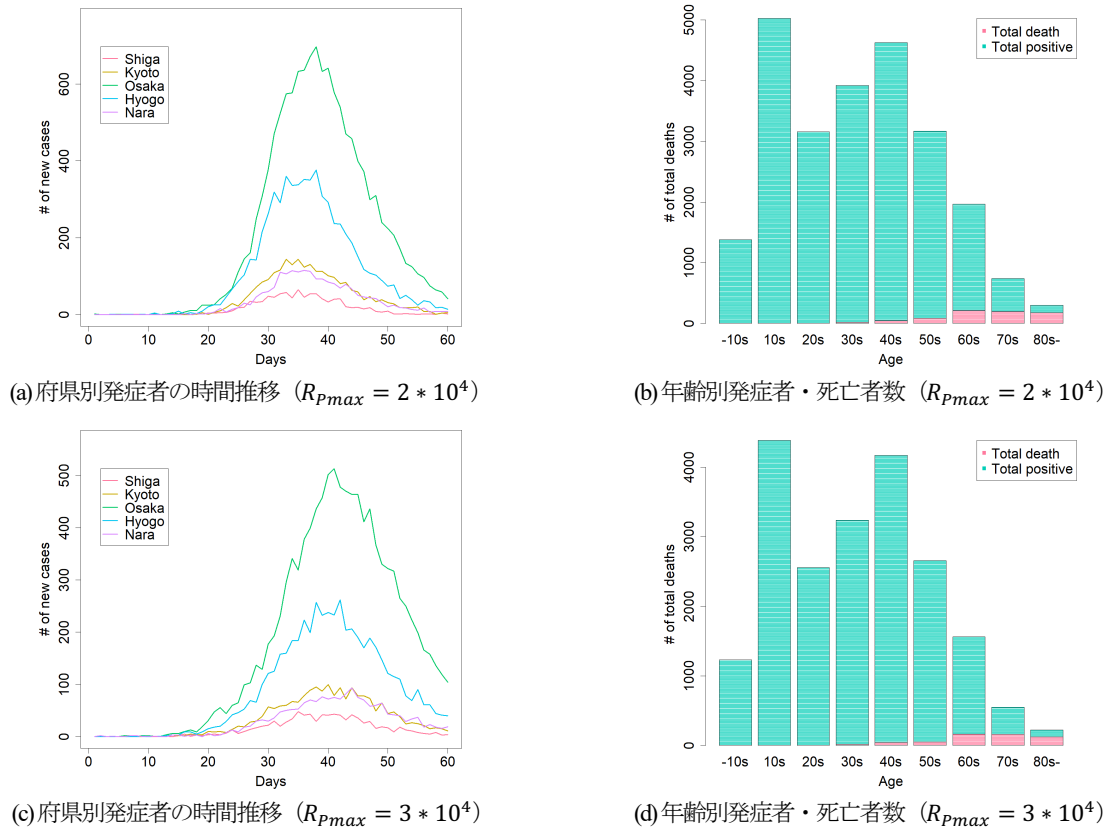


図-6 公共交通移動中感染強度パラメータの感度分析

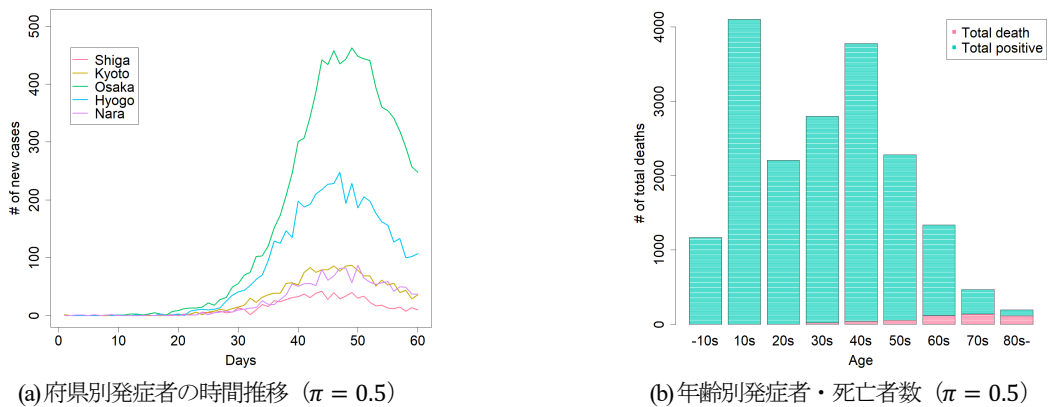


図-7 世帯内感染強度パラメータの感度分析

上で、 π のみを0.25から0.5に変更した場合のシミュレーション結果を図-7に示す。これより、図-7(a), (b)ともに図-6(c), (d)と大きな差異はなく、他のパラメータとの比較で影響は限定的であるといえる。

(3) 活動自粛シナリオの分析

最後に、本シミュレーションを用いて活動自粛による感染抑止効果を分析する。活動自粛をpcats-icats上で表現するため、最大活動自粛率を c_{max} と設定し、シミュレーション開始から d 日目には、式(10)で定義する $c(d)$ の確率でしかトリップを行わないものと仮定する。

$$c(d) = \max(1 - pd, c_{max}) \quad (10)$$

ただし、 p は1日ごとの活動低減率を表す。

Covid-19 パンデミックの第1波では8割の活動自粛が標榜されたことを鑑み、 p を0.01、 c_{max} を0.2と設定し、その他のパラメータは図-6(c), (d)と同様に、 $R_{Omax} = 10^6$ 、 $R_{pmax} = 3 * 10^4$ 、 $\alpha_0 = \alpha_p = 1.0$ 、 $\pi = 0.25$ としてシミュレーションを実行した結果を図-8に示す。

これより、ピーク時の1日あたりの発症者数、および感染者数増加の立ち上がりからピークに至るまでの日数が概ね実測と同様の値になっていることが分かる。一方、府県毎の感染者数の内訳や、年齢別の発症者数に現実との乖離が認められる。その要因として、第一に、アクティビティシミュレーションへの入力値の影響があげられ

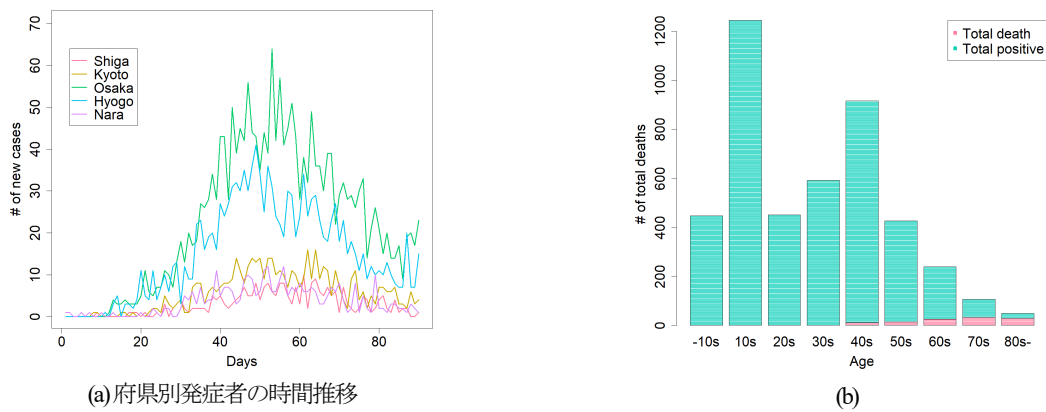


図-8 活動自粛シナリオのシミュレーション結果

る。pcats で必要となる個人ごとの固定トリップのデータを平成 22 年度 PT データに基づいて設定している。そのため、トリップ特性の変化が適切に捉えられていない可能性がある。第二の要因として、icats のパラメータ設定があげられる。本研究ではこれらは経験的にキャリブレーションを行っているのみであり、必ずしも適切な値に設定できているとは限らない。今後はデータ同化などの手法を援用することで実現象を的確に再現するパラメータ設定を検討する必要がある。

5. まとめと今後の課題

本研究では、アクティビティシミュレータと連動して、個人々の自宅外活動、公共交通移動、世帯内での感染リスクを計算する感染シミュレーションモデルを構築した。経験的に設定したパラメータ値に基づいてシミュレーションを実行した結果、時系列的に感染が拡大し、収束する過程を表現できた他、空間的な感染状況についても概ね適切に表現できることを確認した。また、活動自粛シナリオを想定することで、感染抑止効果の検証を行うことができることを示した。

今後はデータ同化を用いることで、covid-19 に伴う人々の行動変容特性や、諸活動における感染予防対策の影響を適切に考慮できるよう、改良を試みる。最終的には、感染拡大と経済活動を両立するための政策検討ツールを構築することを目指す。

脚注

1) pcats ではゾーン単位で活動場所を選択するが、ゾーン内滞在者の空間的分布は算出することができない。この点については、単純にゾーン面積に対する人口密度ではなく、事

業所床面積当たりの人数などを指標に用いることで、改善することは可能であると考えられる。

- 2) キャリブレーション時の計算負荷の観点から、属性によらず同じ値としたが、本来であれば属性別に設定するのが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 厚生労働省：平成 16 年度版厚生労働白書，2004.
- 2) <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20200916/k10012621011000.html> (2020 年 10 月 2 日アクセス)
- 3) <https://www.bbc.com/japanese/54142998> (2020 年 10 月 2 日アクセス)
- 4) Voice 編集部，変質する世界 ウィズコロナの経済と社会，PHP 研究所，2020.
- 5) 藤井 聡，大塚祐郎，北村隆一，門間俊幸：時間的空間的制約を考慮した生活行動軌跡を再現するための行動シミュレーションの構築，土木計画学研究・論文集，No.14, pp.643-652, 1997.
- 6) 布施孝志，原田遼：詳細な交通行動推定のためのアクティビティシミュレーションと観測データの統合に関する研究，土木学会論文集 D3 (土木計画学) Vol. 75, I_575-I_583, 2019.
- 7) 大竹司真，菊池輝：データ同化を実装した需要予測シミュレーションシステムの構築，土木学会論文集 D3 (土木計画学) Vol. 75, I_607-I_613, 2019.
- 8) 西浦博，稲葉寿：感染症流行の予測：感染症数理モデルにおける定量的課題，統計数理 第 54 巻 第 2 号 461-480, 2006.
- 9) Apoorva Mandavilli: What if ‘Herd Immunity’ Is Closer Than Scientists Thought?, New York Times, 2020.
- 10) <https://www.stopcovid19.jp/data/covid19japan-all.csv> (2020 年 10 月 2 日アクセス)
- 11) <https://www.mhlw.go.jp/content/10906000/000628510.pdf> (2020 年 10 月 2 日アクセス)

A SIMULATION MODEL FOR SPATIO-TEMPORAL SPREADING PROCESS OF
INFECTION DISEASE IN URBAN AREAS BASED ON PCATS

Yasuhiro SHIOMI, Akira KIKUCHI, Shinya YANO, and Kuniaki SASAKI