

# 東京都市圏における アクティビティシミュレーションと 観測データの融合手法

小宮山 茜<sup>1</sup>・佐々木 邦明<sup>2</sup>・福田 大輔<sup>3</sup>・石井 良治<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒101-8462 東京都千代田区神田錦町三丁目 22 番地)

E-mail: akane.komiyama@tk.pacific.co.jp

<sup>2</sup>正会員 早稲田大学教授 創造理工学部 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

<sup>3</sup>正会員 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: fukuda@civil.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 一般財団法人計量計画研究所 (〒162-0845 東京都新宿区市谷本村町 2-9)

E-mail: rishii@ibs.or.jp

近年、デジタル技術の普及や多様な働き方の推進により、社会変容が加速している。こうした状況を踏まえ、従来のように四段階推計法を用いて人の行動を集計量として捉えるだけではなく、個人の行動特性を把握しながら、社会の実態に即した検討が必要となっている。本研究では、個人の一日の活動を再現しトリップの連関性を考慮できるアクティビティシミュレーションと、近年その種類と量が飛躍的に増加している交通状態の観測データを用いて、低コストでより精度の高い政策評価や需要予測を可能とする推計手法の提案を行った。東京都市圏全体に対して本手法を適用することにより、予測精度が向上し、アクティビティシミュレーションに対して観測データを補完する有用性が確認された。

**Key Words:** activity model, data assimilation, mobile spatial statistics

## 1. 研究の背景と目的

近年、デジタル技術の普及による新しい価値観の創出や働き方改革等によるワークスタイルの変化により、人の行動も多様化している。そのため個人の移動やその変化に関して詳細に把握するニーズが高まってきている。

そこで本研究では個人の選択行動を再現可能な非集計モデルを用いた予測手法を検討する。非集計モデルの開発当初は、トリップを単位とした分析が行われた。その後、一日のトリップは相互に関連しているとの考えから、活動に着目しその派生需要としてのトリップを記述するアクティビティモデルが開発された。さらにベースを出てベースに戻るまでの一連の活動・トリップを分析の対象としたツアーベースの選択行動モデルが登場した<sup>1)</sup>。交通行動の意思決定には、トリップ間の相互関係は無視できないものが多く、手段選択等の連関性を考慮するモデルを用いることで、都市環状道路や公共交通の整備などに伴う活動時間帯や、一日のツアーパターンの変化の

可能性などを表現できる。しかし、アクティビティモデルでは、一般に 10 年以上の間隔をもって実施される都市圏パーソントリップ調査等を用いることが多いため、ある時点のデータで推計したモデルを用いた予測では、中・長期的な構造変化の考慮や挙動予測の精度に課題があるとされてきた。

一方、近年では IT 技術が発展し、直接的または副次的に個人の行動についての大量データが収集できるようになってきた。交通分野に関しては、GPS を用いた移動軌跡データや、ETC2.0 プローブデータ、通信基地局データを用いた人口推計などがある。観測データは 1 時間毎やリアルタイムといったように高頻度で取得可能であることを利点に持っているが、個人情報を秘匿するために集計等加工済みデータであることが多く、個別の個人の行動に関する情報は除かれることが多いため、個人行動を直接的に分析することは難しい。

そこで、本研究では、個人の一日の活動を再現しトリップの連関性を考慮できるアクティビティシミュレーション

ョンと、近年その種類と量が飛躍的に増加している交通状態の観測データを用いて、より精度の高い政策評価や需要予測を可能とする推計手法の提案を行う。

観測データをモデルによる予測に融合する手法としては、シミュレーションを観測データに合うように個人の位置を補正する。個人の位置補正の目的は観測データを用いてシミュレーションの精度を改善することや、スペースな観測点に対して、数値モデルによって時間・空間的な補完を行うことである<sup>2)</sup>。本研究では、アクティビティシミュレーションを用いて予測した東京都市圏の滞在人数分布を、観測データの滞在人数分布整合するように位置補正をして、モデルの再現性を向上を図ることを目的とする。

## 2. 既存研究の整理と本研究の位置づけ

著者らの先行研究<sup>3)4)5)6)</sup>では、適用するアクティビティモデルとして、操作性などの観点から Bowman & Ben-Akiva<sup>7)</sup>の提案するモデルをベースとし、東京都心三区を対象にシミュレーションを行っている。このシミュレーションから各時間帯でのゾーン別滞在人数を推計し、予測した滞在人数分布の観測データとしてモバイル空間統計<sup>8)</sup>による人数分布を用いて個人の再配置を行い、推定精度の向上を確認した。また、布施ら<sup>9)</sup>は個人の一日の生活行動の軌跡を時間軸上で再現するシミュレーションである PCATS<sup>10)</sup>を使用して、東京都心三区を対象に個人の移動を推計し、推定精度の向上を確認した。大竹・菊池<sup>11)</sup>は仙台都市圏において PCATS と交通流シミュレータ SOUND を組み合わせたシミュレーションシステムを観測データに同化させ、広範な都市圏レベルでもデータ同化が有効であることを示した。また、廣瀬ら<sup>12)</sup>は PCATS を使用して、新型コロナウイルス感染症拡大後の緊急事態宣言下におけるモバイル空間統計と整合するように、在宅勤務率を個人に割り当てることで、東京区部を対象にリモートワークの地理的な分布状況の把握を実現している。

本章の冒頭で述べた著者らの先行研究は、平成 20 年に行われた第 5 回東京都市圏パーソントリップ調査を用いており調査から 15 年程度経過していることや、計算の負荷を低減するために、東京都市圏全域に居住する人の中で、都心三区（港区、千代田区、中央区）を主要なトリップの目的地にした個人のみを抽出して分析を行っており、限定された推計であった。その後、平成 30 年に第 6 回東京都市圏パーソントリップ調査が実施され、この調査に併せてアクティビティ型の交通行動モデルを用いたシミュレータである「東京都市圏 ACT」<sup>12)</sup>が開発されている。本研究では、東京都市圏交通計画協議会か

ら東京都市圏 ACT の提供を受け、東京都市圏全域のシミュレーションを実施し、予測データとして用いることで、より広域のシミュレーションを行い、観測データに整合するよう補正を実施し、再現性の確認を行う。

## 3. シミュレータ及びデータ

### (1) 東京都市圏 ACT<sup>13)14)</sup>

個人単位の行動推計のために、東京都市圏交通計画協議会が提供する東京都市圏 ACT（以下、T-ACT）を活用する。詳細は石井ら<sup>14)</sup>の研究を参照されたい。

T-ACT は Bowman Ben-Akiva 型をベースとしたアクティビティベースドモデルであり、ツアーと立ち寄りの概念を用いて、一日の活動スケジュールを踏まえながらの個人の意思決定メカニズムをモデル化している。

具体的には、ツアーが先に決定された上で、残りの時間内で立ち寄りが発生するように意思決定がモデル化されている。ツアーは発生回数、活動継続時間、活動開始時刻、目的地、主要交通手段の 5 つの段階のモデルから構成され、立ち寄りも発生回数、活動継続時間、目的地の 3 つの段階から構成される。また、ツアーの主要交通手段は自宅を出発してから帰宅するまでの主な交通手段の選択であるため、最終的にトリップ単位での交通手段を割り当てるトリップ交通手段選択モデルを適用している。目的としては通勤、通学、業務、送迎、買物、私事の 6 つの目的を考慮し、目的毎にモデル化が行われている。

予め各種属性（居住地、性別、年齢、就業形態、勤務先・通学先、世帯構成、年収、免許保有、自由に使える自動車）が付与された個人データに対して、上記のアクティビティベースドモデルを適用することで、様々な個人属性が付与された行動データが推計可能なシミュレーションとなっている。推計された行動データは、各個人の 1 日の一連のトリップが格納されたデータ（所謂、パーソントリップ調査のマスターデータに近いデータ）となっており、各トリップの出発地、到着地、出発時刻、到着時刻、目的、交通手段等の情報が付与されているデータとなる。

### (2) モバイル空間統計<sup>8)</sup>

シミュレーションの観測データとして、株式会社ドコモ・インサイトマーケティングが提供する、モバイル空間統計の人口分布統計を用いる。このデータのリアルタイム版では、日本全国の 1 時間ごとのメッシュ別人口分布を 24 時間 365 日把握することが可能である。またその人口は性別・年代・居住地ごとに得ることが可能で、人

口分布，人口推移，人口構成等の人口統計を推計することができる。

今回用いたモバイル空間統計の人口分布統計は，500m メッシュの 1 時間ごとのメッシュ別，性別年代別の人口分布である。また，十分なサンプル数が確保できる年齢層「15~79 歳の男女」を対象とした。

#### 4. 観測データとシミュレーションの融合手法

アクティビティシミュレータによる予測を行った場合に，様々な変数が状態変数として定義可能であり，それに応じた観測データに整合するようにシミュレーションを補正することによって状態の再現・予測精度が改善されると考えられる<sup>15)</sup>。

本研究では，一日の各時間帯でのゾーン別滞在人数を状態変数 $x_t$ としアクティビティシミュレータによって予測する。それに応じた観測を観測変数 $y_t$ として，シミュレーション補正方法として多様な分布に対応可能なパーティクルフィルタの枠組みを利用する。パーティクルフィルタの基本的考えは，モンテカルロ法のアルゴリズムを用いており，基本的に予測，尤度計算，リサンプリングで構成されている。予測は，前項で説明したアクティビティシミュレーション結果を用いている。リサンプリングとは，「粒子 $x_{t|t-1}^i, (i = 1, \dots, M)$ を重み $w_t^i, (i = 1, \dots, M)$ に比例して復元抽出すること」である<sup>16)</sup>。本研究のリサンプリングの手法として，北川<sup>17)</sup>が提案した「ランダム・サンプリング」の考え方を用いた。T-ACT を用いて一日の各時間帯でのゾーン別滞在人数の予測を行い，予測された分布を構成する個人をパーティクルと見立てて，観測データの分布に基づき，各パーティクルの一日の尤度を計算し，それを重みとして個人をリサンプリングすることで，個人の行動を再現しながら，観測に合わせて再現する個人を再配置することになる。従って，再配置を行ったとしても，個人行動の変化として政策評価等を行うことが出来る。推定アルゴリズムは以下の通りである。

1. 予測：T-ACTを用いたシミュレーション $x_t^i$
2. 尤度計算： $w_t = p(y_t | x_t)$

状態変数の観測値 $y_t$ と予測値 $x_t$ を用いて，重み（尤度） $w_t$ を計算する。具体的には，その粒子が観測される確率を $y_t$ から求め，それを各粒子に重み $w_t^i, i = \{1, \dots, M\}$ として与える。

3. リサンプリング  
重みに基づいてランダムリサンプリングを行い，リサンプリングされた個人を用いてゾーン別滞在人数分布を計算する。

#### 5. モバイル空間統計への融合

##### (1) 適用対象

本研究では，状態ベクトル $x_t$ をアクティビティシミュレータにより求められた，全個人の一日の時間帯別滞在位置とする。今回の対象ゾーンは東京都市圏全域の計画基本ゾーン（615 ゾーン），対象時間単位は 1 時間単位とする。

観測ベクトル $y_t$ は，令和元年（2019 年）10 月 28 日のモバイル空間統計により求められた，一日の時間帯別ゾーン内の滞在人数とする。用いるモバイル空間統計の人口分布統計は 1 時間単位，500m メッシュ人口を取得したデータであるため，状態ベクトルと同様のゾーン単位に面積按分により変換した。また，モバイル空間統計の集計属性と合わせるため，15~79 歳の男女を対象とした。

パーティクルフィルタを用いた個人の再配置による，個人属性の偏りを防ぐために，性年齢階層別にリサンプリングを実行した。

##### (2) 適用結果

最初に，アクティビティシミュレータによる予測値（ACT）とモバイル空間統計による観測値（MSS）の居住人口分布に大きな誤差がないか確認する。個人が自宅に滞在している時間帯を午前 3 時と仮定し，比較を行った。

午前 3 時の滞在人数は下記の通りであり，モバイル空間統計との総数誤差は 5.6%であった。モバイル空間統計値がシミュレーション値よりも若干小さいのは，東京都市圏全域で性年齢階層別単位の集計とした際の秘匿処理の影響であると想定されるが，図-1 に示すように各ゾーンの人口分布は概ね一致している。

シミュレーション値：31,180,224 人

モバイル空間統計値：29,527,266 人

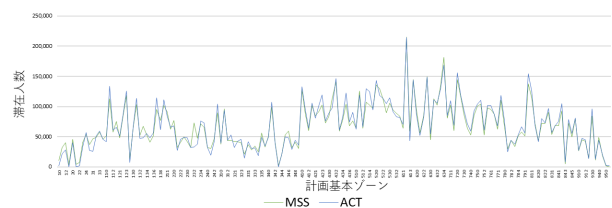


図-1 午前3時における比較（東京都内のみ抜粋）

アクティビティシミュレータにより求められた各時間帯のゾーン別滞在人数を「シミュレーション」，アクティビティシミュレータによる予測をリサンプリングにより観測データと整合させ，算出したゾーン別滞在人数を「リサンプリング後」，モバイル空間統計から得られるゾーン別滞在人数を「観測値」とし，各時間帯でゾーン別滞在人数を比較する。その結果を図-2~図-6 に示

す。グラフ上では東京都内のみを示した。

また、シミュレーションと観測値、リサンプリング後と観測値でそれぞれ平均平方二乗誤差 (RMSE) を算出し、再現精度を検証した (表-1)。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

表-1にてシミュレーションのRMSEを確認すると、午前3時などの居住地に滞在している人が多い時間帯はやや精度が高く、PT データより居住地分布が再現できていることが考えられる。一方で、午後7時などの多くの会社員の定時後の時間帯はやや精度が低い。これはそもそも人口分布統計にあった行動の割合が少ないことを意味しており、残業や自由活動などが適切に再現できていないのではないかと考えられる。

リサンプリング後の結果を確認すると、全ての時間帯でRMSEが小さくなり、精度が約30%程度向上し、本手法の有用性が確認された。また、午後3時の精度向上率が高いが、これは多くの人が勤務先に滞在しており、一定の場所に長時間留まるため、最も再現性が高くなったと考えられる。一方で、シミュレーションの精度が低かった午後7時においては、リサンプリング後も最もRMSEが大きい結果となった。図-5にてゾーン別滞在人数を確認すると、オフィスや繁華街などが多いゾーンに

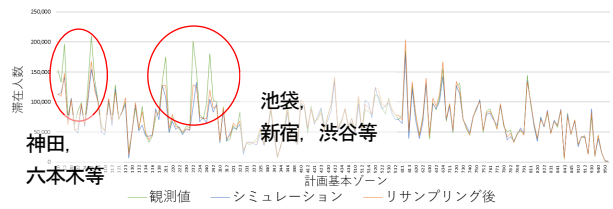


図-5 午後7時におけるゾーン別滞在人数

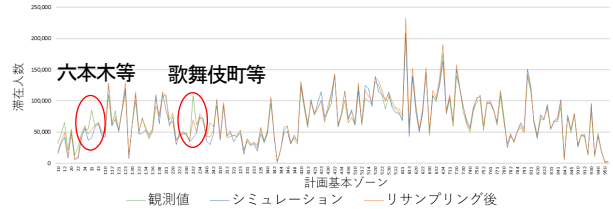


図-6 午後11時におけるゾーン別滞在人数

表-1 リサンプリング前後における精度確認

RMSE	AM 3	AM 10	PM 3	PM 7	PM 11
シミュレーション	7,375	8,519	7,532	9,960	7,888
リサンプリング後	5,201	6,067	4,837	6,961	5,172
精度向上率	29%	29%	36%	30%	34%

おいて観測値との誤差があることが確認された。また、夜の繁華街として栄える六本木や歌舞伎町などにおいては、午後11時における誤差が大きく、終業後の活動の再現性に課題があると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、東京都市圏全域を対象とし、平成30年東京都市圏パーソントリップ調査を用いたアクティビティシミュレータである T-ACT を用いた予測値を得て、観測値であるモバイル空間統計に合わせて個人の再配置を行った。その結果、広域な東京都市圏全域においても観測値と予測値の誤差を小さくすることが可能となり、観測実態に合わせた個人の活動再現が可能となった。

今回は平成30年のパーソントリップ調査と平成31年モバイル空間統計を用いており、パーソントリップ調査時点からの経年変化は少なく、モデルの再現性は比較的高かった。しかし、今後調査時点から期間が経過した際には、観測値を用いることでモデルのみでは表現できない社会変容や土地利用変化を表現できることが期待される。また、モデルで再現性に課題のある終業後の時間帯についても再現性を高めることが可能となり、観測データによるモデルの補完が期待されるが、リサンプリング後も一定の誤差を含んでいるため、自由活動の時間帯に

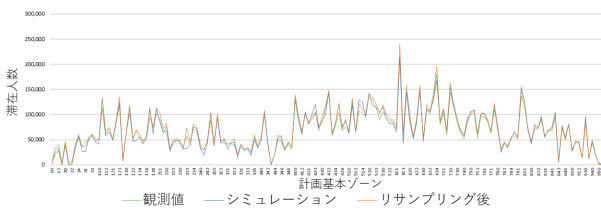


図-2 午前3時におけるゾーン別滞在人数

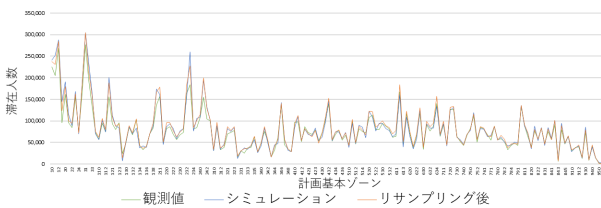


図-3 午前10時におけるゾーン別滞在人数

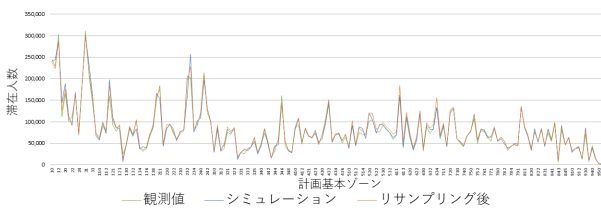


図-4 午後3時におけるゾーン別滞在人数

対する精度向上手法を検討する必要がある。また、個人属性の偏りを防ぐために、性年齢階層別にリサンプリングを実行しているが、居住地分布にずれが生じている可能性があるため、今後の研究課題である。

また、大きな社会変容をもたらしたコロナ禍の影響についても、本手法における反映可能性についても将来的に研究を進めたい。

**謝辞：**本研究は科学研究費補助金「網羅的シミュレーションと機械学習を用いた 精度の高い短期交通需要予測手法の開発（課題番号 20H02280）」によって実施されました。また貴重なデータをご提供いただいた株式会社ドコモ・インサイトマーケティングならびに東京都市圏交通計画協議会に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 永易雅志, 河上省吾: ツアー概念を用いた学生の非集計交通需要予測モデル開発, 土木計画学研究・講演集, No. 21 (1), pp. 379–382, 1998.
- 2) 淡路俊之, 蒲池政史, 池田元美, 石川洋一(編著): データ同化, 京都大学学術出版会, 2009.
- 3) 澤田茜, 川辺拓哉, 白須瑛紀, 佐々木邦明: パーティクルフィルタを援用した観測 OD とシミュレーションを融合した OD 推計手法, 土木学会論文集 D3, Vol. 73 (5), pp. I\_579–I\_588, 2017.
- 4) Sawada, A., and K. Sasaki: The update of the parameters in activity-based simulation by assimilation into Mobile Spatial Statistics, *Asian Transport Studies*, Vol. 5 (3), pp. 439–452, 2019.
- 5) Sawada, A. and K. Sasaki: The asimilation of activity-based simulation and mobile phone-based dynamic population, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 12, pp. 690–708, 2018.
- 6) 澤田茜, 小原拓也, 佐々木邦明: アクティビティモデルとモバイル空間統計を用いた都市圏 OD 推計の可能性, 土木計画学研究・講演集, Vol. 55, 2017.
- 7) Bowman, J.L. and Ben-Akiva, M.E.: Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules, *Transportation Research Part A* 35, pp.1–28, 2001.
- 8) 株式会社ドコモ・インサイトマーケティング: モバイル空間統計 (<https://mobaku.jp/>)
- 9) 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, Vol. 75 (5), pp. I\_575–I\_583, 2019
- 10) 藤井聡, 大塚祐一郎, 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, Vol. 14, pp. 643–652, 1997.
- 11) 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, 土木計画学研究・論文集, 75 巻 5 号 p. I\_607–I\_613, 2019
- 12) 廣瀬光一, 佐々木 邦明, 菊池輝, 斧田佳純, 浅野礼子, 鈴木俊博: リモートワークの普及を考慮したアクティビティシミュレータによるコロナ禍での行動再現, 土木計画学研究・講演集, Vol. 63, 2021.
- 13) 東京都市圏交通計画協議会: 第 6 回東京都市圏 PT 調査 (平成 30 年実施) 特設ページ ([https://www.tokyo-pt.jp/special\\_6th](https://www.tokyo-pt.jp/special_6th))
- 14) 石井良治, 福田大輔, 柳沼秀樹, 日下部貴彦, 茂木渉, 磯野昂士, 渋谷剛史, 末成浩嗣, 西隆太, 伊藤祥太: アクティビティシミュレータ“東京都市圏 ACT”の開発と都市交通政策検討への活用, 土木計画学研究・講演集, Vol. 64, 2022. (投稿中)
- 15) 布施孝志, 佐々木邦明, 福田大輔, 菊池輝, 藤井涼, 福山祥代: 多様な観測データの活用による交通状態推定の一般フレーム, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 53, pp.56–01, 2016.
- 16) 矢野浩一: 粒子フィルタの基礎と応用: フィルタ・平滑化・パラメータ推定, 日本統計学会誌, Vol. 44, 第 1 号, pp.189–216, 2014.
- 17) 北川源四郎: モンテカルロ・フィルタおよび平滑化について, 統計数理, No. 44, pp.31–48, 1996.

(Received ??, 2022)  
(Accepted ??, 2022)

## ASSIMILATING OF THE ACTIVITY-BASED SIMULATION AND OBSERVATION DATA IN A TOKYO METROPOLITAN AREA

Akane KOMIYAMA, Kuniaki SASAKI, Daisuke FUKUDA, Ryoji ISHII

In recent years, social changes have accelerated due to the advancement of technology and the promotion of diverse work styles. In light of these circumstances, it is necessary to consider the aggregate amount of human behavior using the four-step estimation method as in the past and understand the behavioral characteristics of individuals and consider the actual situation in society. In this study, we proposed an estimation method that enables more accurate policy evaluation and demand forecasting at a lower cost, using activity simulations that can reproduce an individual's daily activities and take into account the linkage of trips, and observation data of traffic conditions, the types and amount of which have increased dramatically in recent years. By applying this method to the Tokyo metropolitan area, the forecasting accuracy was improved and the usefulness of supplementing observation data to activity simulation was confirmed.