

逐次的意思決定過程モデルとモバイル空間統計を用いた個人の行動予測の適用性に関する研究

井坂 凌佑¹・佐々木 邦明²

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻

(〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目4-1)

E-mail:le10rmaec-fcb@akane.waseda.jp

²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三丁目4-1)

E-mail:sasaki.k@waseda.jp

近年、交通サービス水準評価や個人の生活に関する質的評価、経済評価が求められており、また、新型コロナウイルス感染症の影響により人々の生活が大きく変化していることから、移動目的や場所、時間帯など個人の移動に関する詳細について把握する必要性が生じてきている。個人の移動を把握するモデルは様々であり、実際の観測データと同化させることで現況に即した移動の推定が行える。そこで、本研究では、逐次的意思決定過程モデルPCATSと観測データであるモバイル空間統計を用い、これらを同化させることで個人の移動の予測を行った。その結果、データ同化を行う前後で予測精度が向上し、現況に即した個人の移動の推計が可能であることを示すことができた。

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

1. はじめに

(1) 背景・目的

我が国では、様々なところで公共交通政策やインフラの整備などが行われており、これらの事業評価では交通需要予測が重要な役割を持っている。また、近年、交通サービス水準の評価や個人の生活の変化による安全性・利便性・快適性といった質的評価、経済評価なども求められている。更には、昨年からの新型コロナウイルス感染症による影響により、テレワークの実施や外出自粛などが行われ、人々の生活が大きく変化している。このことから、移動目的や場所、時間帯など個人の移動に関する詳細について把握する必要性が生じてきている。その手法として、非集計の交通行動モデルが従来利用されてきており、個人のトリップに着目してトリップ単位で分析を行うトリップベースから、ツアー単位で分析を行うツアーベースへが提案され、アクティビティベースモデルの適用も海外では進んできた。アクティビティベースモデルでは個人の移動は活動の派生需要であるという立場で考えられており、個人属性や時空間制約の制限の下、個人の活動内容や場所、時間などを決定し、その間の移動をしている。しかし、国内においては、アクティビテ

ィモデルが実務に適用された例は限られている。その理由として、モデルパラメータ推定に必要なアクティビティダイアリ調査の負担が大きいことや、詳細な予測を行うため、その安定性に問題があったためである。

一方、近年では個人の行動履歴や移動、滞在に基づいたデータが利用可能となってきた。その例として、NTTドコモが提供する、1時間毎に日本全国のメッシュ別滞在人数を24時間365日把握することができる「モバイル空間統計」¹⁾やETC2.0車載器及びカーナビから収集された、走行位置の履歴などのデータである「ETC2.0プローブデータ」²⁾などがある。これらは個人情報秘匿のために集計量で提供されることが多く、それらは継続的で安定した値が提供されている。

そこで、シミュレーションモデルによって行動特性を把握することと、これらの利用可能なデータによって観測される値に近づける「データ同化」の手法を用いることで、現況に即した個人の移動の予測を行うことができ、その先の交通政策分析や分析に関する量的・質的評価に利用できるのではないかと考えられる。

以上の背景から、本研究ではアクティビティベースモデルと観測データを用い、現況に即した個人の移動を推定することを目的とする。本研究では、アクティビティ

ベースモデルのうち、個人の生活行動に関する意思決定を逐次的に決定し、リアルタイムのデータとの親和性が高く、様々な政策分析に利用できると考えられている生活行動モデルPCATS³⁾ (Prism-Constrained Activity-Travel Simulator) を用いて個人の移動に関する予測を行い、PCATSを用いる上での課題や問題点などを検討する。

(2) 既存研究と本研究の位置づけ

本研究に関する既存研究を、アクティビティモデルに関する研究と、データ同化に関する研究、PCATSによる交通需要予測に関する研究に分けて示す。

a) アクティビティモデルに関する研究

Bowman and Ben-Akiva⁴⁾は1日の活動が自宅を出発する前にすべて決定されることを仮定したpre-trip型の離散選択モデルにおいて、活動パターンとそのパターンを構成する主活動の開始時刻、場所と交通手段をネスト構造にして、ネステッドロジットモデルを用いて1日の活動パターンの生成を定式化した。一方で藤井ら³⁾は、活動内容を順次決定するモデルにおいて、時空間プリズム制約を考慮したうえで、個人の生活行動に関する意思決定を時間軸上で逐次再現するモデルPCATS (Prism-Constrained Activity-Travel Simulator) を構築した。また、Arentze and Timmermans⁵⁾は義務的活動を次残に決定し、観測データに基づいて活動を付加していくアルゴリズムを持つモデルALBATROSSを開発している。

b) データ同化に関する研究

高嶋・塩見⁶⁾は、カルマンフィルタ、パーティクルフィルタを用い、観測システムと交通流モデルを組み合わせたデータ同化により高速道路での未観測部分の交通容量の変動を可視化し、サグ部での渋滞状況を把握する手法を示した。長谷川ら⁷⁾はパーティクルフィルタを用い、行動モデルと長期間のCDRデータを同化させ、人の移動経路の推定を図った。経路の時間的な予測、距離の部分での予測ともに、精度の良い位置推定を可能とした。また、澤田ら⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾による一連の研究では、甲府都市圏および東京都心三区において、Bowman and Ben-Akiva型のアクティビティモデルを用いて、モバイル空間統計データに同化させることで、再現性の向上を図り、PT調査より時間が経過して状況において、モデルパラメータの修正を行うことで新たな調査データを用いることなく、OD推計や定数項の更新などを用いて現実に即したシミュレーションが可能であることを示した。

c) PCATSによる交通需要予測に関する研究

布施・原田は¹²⁾、アクティビティモデルPCATSとモバイル空間統計を用い、千代田区、港区、中央区の都心三区を対象に現況に即した個人の移動の再現を図った。PCATSが東京都心三区での適用可能であることに加え、観測データとの統合により高精度な時間帯別のゾーン滞

留人口やODの推計可能性を示した。また、大竹・菊池¹³⁾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と観測データを統合させ、広範な都市圏レベルでもフィルタリングが適用可能であることや配分計算結果が改善されたことなどを明らかにした。

本研究では、逐次的意思決定過程モデルPCATSを用いて個人の行動を予測し、データ同化を用いて現況に即した個人の移動の推定を行うことを目的とする。また、PCATSを適用するうえでの課題や問題点を細かく分析する。澤田らの既存研究のもと、本研究ではPCATSを用いることで、プリズム制約などを考慮したシミュレーションが可能となる。

2. シミュレーションシステムとデータ同化

(1) 逐次的意思決定過程モデルPCATS³⁾

本研究では、藤井らが開発した生活行動マイクロシミュレーション PCATS (Prism-Constrained Activity-Travel Simulator) を用いる。PCATS は、逐次的意思決定過程モデルの1つであり、時空間プリズム制約を考慮した上で、個人の生活行動に関する意思決定を時間軸上で逐次再現する生活行動シミュレータである。逐次的意思決定過程モデルは、

- ① 最初の活動の要素（活動内容、場所、時間等）を決定
⇒ 最初の活動を実行
- ② 2番目の活動の要素を決定
⇒ 2番目の活動を実行
- ③ 3番目の活動の要素を決定
⇒ 3番目の活動を実行（以下同様に続く）

というような過程となっている。逐次的意思決定過程モデルは少ない計算費用と計算時間で個人の行動の再現ができる。個人の行動が逐次的な意思決定ではない局面もあるが、日常的な生活予測には適用可能であると考えている。意思決定が完全に逐次的であるとは限らず全ての行動に適用することは出来ない。PCATS は生活環境や交通環境の変化に伴う、個人の生活行動全般の予測を図ることで、従来の行動モデルでは予測することが難しかった、交通速度の改善や勤務条件の変化等の交通政策が、個人へ及ぼす総合的な影響の評価を目指すものであり、以下にその仕組みについて記す。

PCATS では、1日の時間は活動の要素が予め決定している「固定時間帯」と空き時間に自分の意思で活動を決められる「自由時間帯」で構成されるという仮定に基づいている。これらの前提をもとに、PCATS には「個人・世帯属性」、「交通ネットワーク属性」、「地域属

性」, 「固定活動スケジュール」を入力し, そこから「全自由時間帯における活動の要素(活動内容, 開始時刻など)」, 「全自由時間帯における移動の要素(交通機関, 出発時刻など)」を出力している。

また, 図-1に示すように, 固定時間帯から自由時間帯へ移る時点, 自由時間帯において1つの自由活動が終了した時点, 「意思決定時点」とし, Nested Logit Model等の離散選択モデルを用いて, 次に続く活動及び移動の要素を逐次的に決定していき, 1日の生活を再現するという仕組みとなっている。

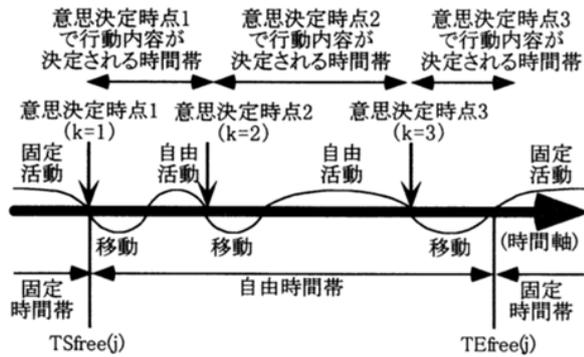


図-1 PCATSにおける意思決定時点³⁾

(2) データ同化

データ同化とは, 予測モデルを観測データとの統合により補正する手法のことである。データ同化は観測データを数値シミュレーションに埋め込み, 馴染ませることで, 予測精度を向上させ, 予測のみでは真の状態から徐々に離れていく解析結果を, 真の状態へと近づけることが可能となる。以下に, 布施・原田¹²⁾より示された, 逐次フィルタリングによる個人位置の更新を行うことで個人の位置を更新する手法を示す。

この手法では, データ同化を数学的に記述したモデルである状態空間モデルの中の一般形である一般状態空間モデルを用いている。一般状態空間モデルは「初期分布」「状態ベクトル x_t 」「観測ベクトル y_t 」「システムモデル」「観測モデル」の5つより構成されている。状態ベクトル x_t は $x_t = [x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^M]^T$ として時刻 t における対象ゾーン内の全個人の位置を, 観測ベクトル y_t は $y_t = [y_t^1, y_t^2, \dots, y_t^M]^T$ として, モバイル空間統計等の観測データから得られる, 時刻 t における各ゾーンの滞在人数を示している。また, 観測モデルは, ベクトル x_t をゾーン別人数を示すベクトルに変換した状態ベクトル x_t^i と観測ベクトル y_t の類似度(尤度と定義)を表しており, ゾーンごとの人数誤差(重み付き)の二乗和の逆数となっている。以下に, 手法の手順を示す。

a) PCATSによる予測

本研究で用いるシミュレーションモデルであるPCATSを利用する。時刻 $t-1$ におけるある個人 i の位置 x_{t-1}^i が分

かっている時, これを入力データに加えることで, PCATSにより時刻 t におけるある個人 i の位置 x_t^i が推計される。これを以下の式で表す。

$$x_t^i \sim p(x_t^i | x_{t-1}^i)$$

b) パーティクルの作成

各個人 i に対して, フィルタ分布 $p(x_t^i | x_{t-1}^i)$ に従って時刻 t における個人 i の位置を表すパーティクル x_t^i をそれぞれ N 個生成する。

c) 一期先の予測

パーティクル $x_t^i (i = 1, 2, \dots, N)$ を生成した後, PCATSに従い, 時刻 t での各パーティクル x_t^i を遷移させ時刻 $t+1$ における予測分布を表す予測パーティクル群 x_{t+1}^i を得る。

d) 尤度の推定

得られた各予測パーティクルをゾーン別滞在人数を要素として持つベクトルに変換する。変換後のパーティクルを x_{t+1}^i とする。この各パーティクルに対して, 観測データであるゾーン滞在別人数から観測モデルを利用して, 各パーティクルの重み $\beta_{t+1}^i (i = 1, 2, \dots, N)$ を y_{t+1} と x_{t+1}^i の重み付きユークリッド距離の逆数として, 以下の式より算出する。

$$\beta_{t+1}^i = \frac{w_t^i}{\sum_{j=1}^M w_{t+1}^j}, w_t^i = p(y_{t+1} | x_{t+1}^i) = p(y_{t+1} | x_{t+1}^i)$$

e) フィルタリング

各予測パーティクル x_{t+1}^i を, 重み β_{t+1}^i に比例する割合で N 個復元抽出する。その後, 再度パーティクル x_{t+1}^i に変換し, 時刻 $t+1$ における各個人位置のフィルタ分布を求める。そのフィルタ分布の最頻値を各個人位置の推定値とする。

f) 活動場所の再配置と繰返し

その推定値をもとに, 時空間プリズム制約のもとで各個人の位置を再配置する。再配置の対象は当該時間に「自由活動(宅外)」をしている個人のみとする。その後, c)~f)の流れを1日の最後の時間帯まで実行する。

3. PCATSの適用

(1) 対象地域

本研究は, 山梨県の甲府都市圏である「甲府市・甲斐市・山梨市・韮崎市・南アルプス市・笛吹市・中央市・昭和町・増穂町・市川三郷町」の7市3町を対象地域とした(図-2)。調査対象ゾーン数は66ゾーンである。

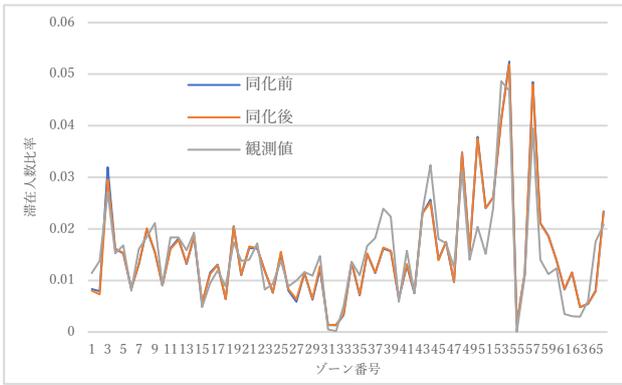


図-3 9時におけるゾーン別滞在人数比率

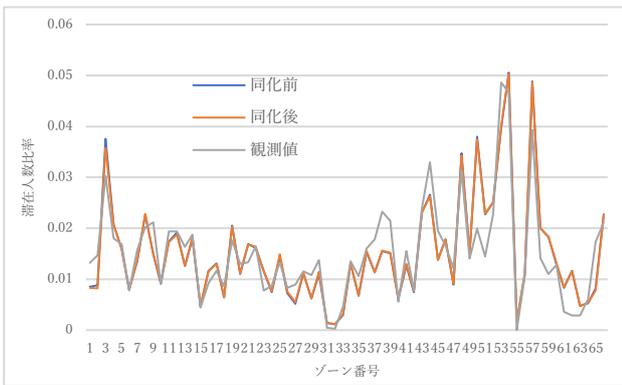


図-4 12時におけるゾーン別滞在人数比率

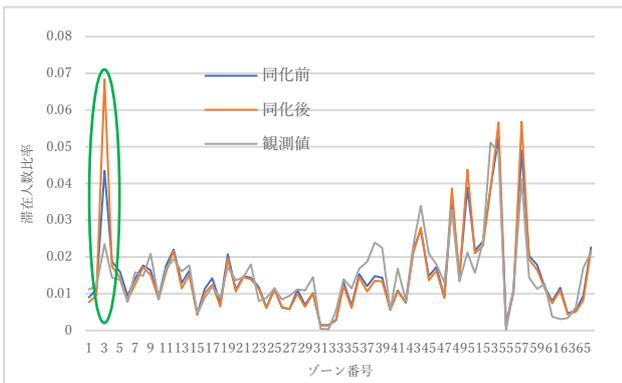


図-5 17時におけるゾーン別滞在人数比率

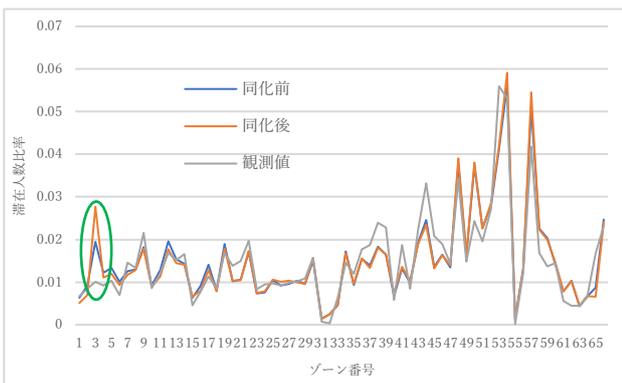


図-6 21時におけるゾーン別滞在人数比率

表-2 同化前後における観測ベクトルとの重み付きユークリッド距離

ユークリッド距離	9:00	12:00	17:00	21:00
同化前	1124	52735	109	79
同化後	1043	49007	83	68
精度向上率	7.2%	7.1%	23.9%	13.9%

表-2に示す通り、全時間帯で同化後の重み付きユークリッド距離が同化前の重み付きユークリッド距離に比べて減少しており、観測値に近づいていることが分かった。よって、このことからデータ同化により現況に即した個人の移動の推定が可能となったことが示された。また、精度向上率に関しては、17時の段階で一番高く、次いで21時というような結果となっていた。一方で、17時、21時の重み付きユークリッド距離に比べ、9時、12時における重み付きユークリッド距離が非常に大きくなってしまったのは、観測値の滞在人数比率があまりにも小さいゾーンが大きく影響してしまったためであると考えられる。

(5) PCATS適用における課題や問題点、留意点

表-2より、同化前と同化後で重み付きユークリッド距離が減少しており、全体として精度の向上が見られた。一方で、図-3、図-4、図-5、図-6よりPCATSへのモバイル空間統計等の人口統計の同化アルゴリズムの適用上の課題や問題点、留意すべき点として以下のことが考えられる。

a) 宅外自由活動の割合による再配置への影響

図-3、図-4、図-5、図-6より、同化前と同化後で滞在人数比率が大きく変化していないゾーンがいくつか見られる。特に、9時、12時においては66ゾーンほとんどにおいて、滞在人数比率が大きく変化していないことがわかる。この原因としては、該当時間帯において「宅外自由活動」を行っている個人が少ないことが挙げられる。データ同化におけるフィルタリング手法において、時空間プリズム制約のもとで各個人の位置を再配置することで、現況に即した個人の移動を推定しているが、その再配置の対象を「宅外自由活動」をしている個人としているため、その個人の割合が低ければ低いほど、データ同化によって再配置できる個人が少なく、データ同化前後で大きく変化しないことになってしまう。各時間帯における活動実行人数の割合を示す表-3を見ると、PCATSの出力で「宅外自由活動」の個人を示す、「自由活動」を行っている人数の割合が、9時、12時では3.3%と非常に低く、また、17時、21時においても13%程度と9時、12時と比較すると割合が増えてはいるものの、全個人の中では低い割合となっている。そのため、図-3、図-4、図-5、図-6から、17時、21時においては9時、12時と比較して、

データ同化前後で滞在人数比率に変化があるゾーンが多くなっていることが裏付けられる。このことから、宅外自由活動を行っている人数の割合がデータ同化の再配置の部分に大きな影響を及ぼすと示唆される。

表-3 各時間帯における活動人数の割合(%)

	9時	12時	17時	21時
固定活動	56.2	63.4	44.1	5.5
自由活動	3.3	3.3	13.1	12.8
在宅活動	38.1	32.0	40.0	79.2
移動中	2.4	1.3	2.8	2.5

b) 勤務先の変化や土地利用の大規模変化等への対応

図-3, 図-4, 図-5, 図-6よりゾーン番号37, 38や50, 51等では同化前後で滞在人数比率が観測値に近づいていなく、大きな差が生じていることが読み取れる。ここで、24時間合計でのパーソントリップ調査とモバイル空間統計のゾーン別滞在人数比率を比較してみると(図-7)、やはり上記のゾーンにおいて滞在人数比率に差が大きく生じていることがわかる(図-7の赤色の丸の箇所)。この原因としては、ゾーン38ではパーソントリップ調査が行われた平成17年以降に駅や駅前改築が行われ¹⁾、大型商業施設が開業したこと、ゾーン50では大規模工場が転出してしまったことが挙げられ、土地利用の変化などにより、勤務先が変化し、固定活動場所が変化してしまったと考えられる。

澤田ら¹⁰⁾¹⁾の研究では、制約が生じないBowman-Ben-Akiva型のモデルを同じ甲府都市圏に用いており、予測においてより高い精度の向上が確認されているが、PCATSではデータ同化の際には固定活動を行っている個人の活動場所の変更できない制約があり、PCATSにおいては、長期の土地利用の変化に対しては、個人の固定活動場所の変化が考慮できず、今後の検討すべき課題であるといえる。

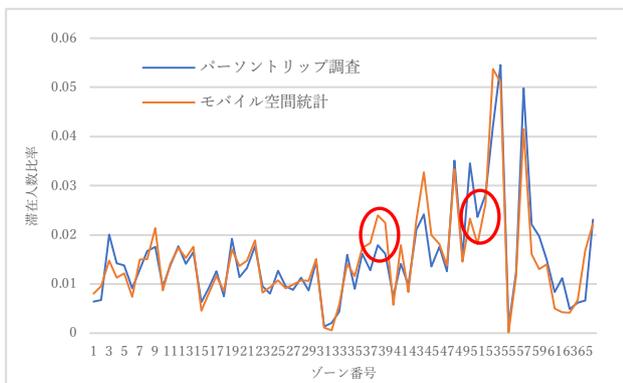


図-7 パーソントリップ調査とモバイル空間統計のゾーン別滞在人数比率の比較 (24時間合計)

(c) データ同化手法の改善

図-5, 図-6より、特にゾーン番号3でデータ同化前に比べデータ同化後の滞在人数比率が大きくなってしまい、観測値からかなり離れてしまっている(図-5, 図-6の緑色の丸の箇所)。ゾーン3は甲府駅の南側のエリアであり、山梨県庁や甲府市役所、百貨店などを含み人出が多いとされるエリアである(図-8)。本研究で用いたデータ同化手法では、シミュレーション100回に対し、観測データとの尤度からシミュレーションを100個復元抽出し、各個人の活動位置に関してその最頻値を選定し、データ同化後の推定値としているが、ゾーン3で活動や移動をしている個人が多い17時, 21時の時間帯では、データ同化の手法において最頻値を選定したら活動場所がゾーン3になってしまったという個人が多く、その結果、同化前では活動場所がゾーン3ではなかった個人が同化後では活動場所がゾーン3になってしまい、全体として滞在人数比率が観測値に近づかず大きく離れてしまったのではないかと考えられる。今回は特にゾーン3で同化後の滞在人数比率が観測値から大きく離れてしまっているが、ゾーン3だけでなく、他にも同化後の滞在人数比率が観測値から離れてしまっているゾーンが見られる。PCATSを適用するにあたって、シミュレーションを復元抽出する際には、シミュレーション単位でなく個人単位で抽出するなど、データ同化手法の改善が必要であると考えられる。



図-8 ゾーン番号3

4. まとめ

本研究では、逐次的意思決定過程モデルPCATSとモバイル空間統計を同化させることで、現況に即した個人の移動の推定を行った。

平成17年度パーソントリップ調査データを入力データとし、データ同化の手法を用いてPCATSとモバイル空間統計を同化させた結果、観測データとデータ同化後のユ

ークリッド距離が、観測データとデータ同化前のユークリッド距離に比べ減少しており、移動の予測に関して精度向上が見られ、現況に即した個人の移動の推定可能性を示すことができた。

一方で、PCATSを適用するうえで、の課題や問題点、留意すべき点が見つかった。まず、宅外自由活動を行っている人数の割合が低いと、再配置を実行できる個人が少なく、データ同化前後で滞在人数(比率)が大きく変化しないことから、宅外自由活動を行っている人数の割合がデータ同化の再配置の部分に大きな影響を及ぼすということが挙げられる。また、データ同化の際には、固定活動を行っている個人の活動場所は変更できないことから、PCATSは勤務先の変化や土地利用の大規模変化などへの対応には限界があることも示された。更には、データ同化の手法の改善も挙げられた。一部のゾーンで、データ同化を行ったにもかかわらず滞在人数比率が観測値から大きく離れてしまったことから、新たなデータ同化手法の検討が考えられる。今後は、本研究で提示された課題や問題点を改善しつつ、モデルのパラメータの更新やデータ同化手法の検討を通して、より精度の高い予測手法を確立させることが必要であると考えられる。また、政策分析に利用させるうえで、リアルタイム同化のアルゴリズムを検討する必要があると考えられる。

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）」によって実施されている。

参考文献

- 1) NTT ドコモ：モバイル空間統計, <https://mobaku.jp/>.
- 2) 国土交通省 道路：車載器の ID 付きプローブ情報の利用及び取り扱い方針, https://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/spot_dsrc/oshirase.html.
- 3) 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, No.14, pp.643-652, 1997.

- 4) Bowman and Ben-Akiva: Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 35, Issue 1, pp.1-28, 2001.
- 5) Arentze, T.A. and Timmermans, H.J.P.: A learning-based transportation oriented simulation system, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 38, Issue 7, pp.613-633, 2004.
- 6) 高嶋望都, 塩見康博：データ同化を用いた高速道路サグ部における渋滞現象の分析, 土木学会論文集 D3, Vol.73, No.5, pp.I_1073-I_1082, 2017.
- 7) 長谷川瑠子, 関本義秀, 金杉洋, 檜山武浩：同化手法を用いたスパースな携帯基地局情報に基づく人の移動推定, 交通工学論文集, 第1巻, 第4号, pp.A_9-A_17, 2015.
- 8) Sawada, A. and K. Sasaki: The Update of the Parameters in Activity-Based Simulation by Assimilation into Mobile Spatial Statistics, *Asian Transport Studies* 5(3)439–452, 2019.
- 9) Sawada, A. and K. Sasaki: The Assimilation of Activity-Based Simulation and Mobile Phone-Based Dynamic Population, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 12 690–708, 2018.
- 10) 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 73(5) I_579 -I_588, 2017.
- 11) 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 55, 2017.
- 12) 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) 75(5), I_575-I_583, 2019.
- 13) 大竹司真, 菊池輝：シミュレーションと観測データの統合による交通需要予測手法の構築と分析, 第 58 回土木計画学研究発表会・講演集, 2018.
- 14) 甲府都市圏の人の動き～平成 17 年度甲府都市圏パーソントリップ調査から～：<https://www.pref.yamanashi.jp/toshikei/documents/12160986277.pdf>. (最終閲覧日 2021 年 3 月 4 日)
- 15) 飯島翼：アクティビティモデルに人口を同化した甲府都市圏の交通需要予測, 山梨大学卒業論文, 2019.

(?)

RESEARCH ON THE APPLICABILITY OF INDIVIDUAL BEHAVIOR PREDICTION USING SEQUENTIAL DECISION-MAKING PROCESS MODELS AND MOBILE SPATIAL STATISTICS

Ryosuke ISAKA, Kuniaki SASAKI

In recent years, transportation service level evaluations, qualitative evaluations of individual lives, and economic evaluations have been required, and people's lives have changed significantly due to the effects

of the new coronavirus infection. From these things, It is necessary to grasp the details of personal movement such as purpose of movement, place of movement, and time zone. There are various models for grasping the movement of individuals, and by assimilating with actual observation data, it is possible to estimate the movement according to the current situation. Therefore, in this research, I predicted individual the movement of individuals by assimilating the sequential decision-making process model PCATS with mobile spatial statistics. As a result, the prediction accuracy improved before and after the data assimilation, and it was possible to estimate the movement of individuals according to the current situation.